

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

ESTUDO DA HOMOGENEIDADE E DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS BÁSICOS
DO EXPERIMENTO DE LEITO FLUIDIZADO DEN-01

por

Sergio Luiz Lena Souto

Dissertação para obtenção do Título de
Mestre em Engenharia

Porto Alegre, abril de 1998

ESTUDO DA HOMOGENEIDADE E DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS BÁSICOS
DO EXPERIMENTO DE LEITO FLUIDIZADO DEN-01

por

Sergio Luiz Lena Souto
Engenheiro

Dissertação submetida ao Corpo Docente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, PROMEC, da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Título de

Mestre em Engenharia

Área de Concentração: Fenômenos de Transporte

Orientador: Prof. Dr. Marco Tullio de Vilhena

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Cláudio de Oliveira Graça

Prof. Dr. Vilson Carlos da Silva Ferreira

Prof. Dr. Sergio Viçosa Möller

Prof. Dr. Paulo Smith Schneider

Coordenador do PROMEC

Porto Alegre, 13 de abril de 1998.

DEDICATÓRIA

À minha esposa Josmari pelo apoio, carinho e dedicação.

À meus filhos Gabriel, Laura e Eduardo pelo tempo em que não pude estar junto a eles.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Marco Túlio de Vilhena, cuja orientação, empenho e insistência foram fundamentais na execução deste trabalho.

Ao colega Egon Pinheiro André pela incansável dedicação ao trabalho, não medindo esforços na ajuda aos companheiros.

Ao pessoal do IPH que gentilmente possibilitou a construção e a calibração do medidor de vazão.

Ao Prof. Farang Sefidwash pela idéia do conceito de reator nuclear que possibilitou a elaboração deste trabalho.

Finalmente, a todas as pessoas que auxiliaram direta e indiretamente na elaboração deste trabalho.

RESUMO

Neste trabalho foi feito um estudo hidráulico de um experimento a leito fluidizado onde aplicou-se a técnica de absorção gama para a determinação da porosidade do leito. Verificou-se a influência da colocação de uma tela para limitação da altura do leito bem como do comportamento do mesmo com a introdução de um anel metálico de diâmetro próximo do diâmetro do tubo de fluidização. As medidas foram realizadas em um modelo hidráulico especialmente construído para esta finalidade. No modelo foram utilizadas esferas de aço com diâmetro de 8 mm que fluidizaram em água à temperatura ambiente em circuito fechado. Foram feitos testes com 20 kg, 30 kg e 40 kg de esferas. Para as medidas utilizou-se a radiação gama proveniente de uma fonte de cobalto 60 com atividade de 700 mCi colimada com chumbo. O detector utilizado foi um cristal de NaI (TI). Os resultados obtidos mostram que tanto a tela como o anel provocam a divisão do leito fluidizado em duas partes. A tela faz formar um leito fixo invertido na sua superfície inferior. O anel faz com que o leito seja transportado para a parte de cima do mesmo a medida em que ele é introduzido no leito. Verificou-se que a maior expansão do leito se dá para uma relação entre a altura do leito compactado e o diâmetro do tubo de fluidização de 0,55, correspondendo ao teste com 30 kg de esferas. A formação de jorro acontece sempre para a mesma vazão, em torno de 16 l/s, independente da relação entre a altura do leito compactado e o diâmetro do tubo de fluidização. Na fase de leito particulado a porosidade é menor no centro do leito e aumenta nas camadas superiores e inferiores.

ABSTRACT

In this work an experimental hydraulical study of the fluidized bed reactor concept was performed, where the absorption gamma ray technique was applied for the determination of bed porosity. The influence of the use of a screen for the limitation of the bed height was investigated as well as the behavior of the bed by introducing a metal ring with a diameter close to the diameter of the fluidization tube. Measurements were performed in a hydraulical model built with this purpose. In the model, steel spheres with 8 mm diameter were fluidized in water at room temperature in a closed loop. Tests with 20, 30 and 40 kg of spheres were made. Bed porosity was measured with a cobalt-60 gamma ray source, with 700 mCi activity, and a NaI (TI) crystal detector. Results show that both screen and ring split the bed in two parts. The screen leads to the formation of a fixed bed in the top of the test section. By moving the ring downwards, the bed is displaced upwards. It was observed that the largest bed expansion occurs for a value of 0.55 of the ratio between the height of the compacted bed and the tube diameter, which corresponds to a mass of 30 kg of spheres. Jet formation occurred always for the same flow rate, about 16 l/h, without dependence on the ratio between the height of the fixed bed and tube diameter. For the particulate bed regime, porosity is lower at the center of the bed, increasing at the upper and lower layers.

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO E FUNDAMENTOS	1
1.1. Introdução	1
1.2. Revisão bibliográfica	4
1.3. Fundamentos	5
1.4. Objetivos	7
2. DESCRIÇÃO DO EXPERIMENTO, DA INSTRUMENTAÇÃO E CALIBRAÇÃO	9
2.1. Modelo inicial	9
2.2. Desenvolvimento do modelo	11
2.3. Modelo utilizado	13
2.4. Medidor de vazão	14
2.4.1. Perda de carga	19
2.4.2. Determinação da incerteza nas medidas	19
2.5. Medidor de massa específica	22
2.6. Determinação da porosidade	26
3. MEDIDAS EXPERIMENTAIS	27
3.1. Massa específica e porosidade por método convencional	27
3.2. Geometria do tubo de fluidização	27
3.3. Medidas realizadas com atenuação de raios gama	27
4. ANÁLISE E RESULTADOS	34
5. CONCLUSÕES	38
6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	40
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	41

LISTA DE SÍMBOLOS

B_a	Fator de “build-up” para água
B_e	Fator de “build-up” para esfera
B_p	Fator de “build-up” para parede
C	Coefficiente de vazão
C_k	Coefficiente de sensibilidade em relação a constante do instrumento
C_t	Coefficiente de sensibilidade em relação ao tempo
C_v	Coefficiente de sensibilidade em relação ao volume
$C_{\Delta h}$	Coefficiente de sensibilidade em relação a leitura no manômetro
d	Massa específica
d_a	Massa específica da água
d_e	Massa específica das esferas
d_m	Massa específica do mercúrio
D_0	Diâmetro do orifício
D_1	Diâmetro conduto do medidor de vazão
g	Aceleração de gravidade igual a $9,81 \text{ m/s}^2$
h	Diferença de pressão estática no medidor de vazão
Δh	Variação da diferença de pressão estática no medidor
h_p	Perda de carga no medidor de vazão
H_0	Altura do leito colapsado
M_{med}	Altura do leito máxima obtida sem haver formação de leito agregativo
H_{max}	Máxima expansão do leito particulado
I	Intensidade do feixe de fótons com blindagem
I_0	Intensidades do feixe de fótons sem blindagem
I_1	Intensidade do feixe de fótons atravessando o meio 1
I_2	Intensidade do feixe de fótons atravessando o meio 2
k	Constante do instrumento medidor de vazão
k_e	Fator de multiplicação de neutrons num meio multiplicador de neutrons
k_p	Fator de atenuação das paredes do tubo de fluidização
k_t	Constante do instrumento medidor de massa específica

l	Espessura transversal do leito fluidizado atravessado pela radiação gama
m_a	Massa de água em 1 cm ³ de leito
m_e	Massa da esfera em 1 cm ³ de leito
M_m	Massa específica do meio fluidizado ou não
M_{fe}	Massa total de esferas dentro do tubo de fluidização
M₁	Massa específica para o meio 1
M₂	Massa específica para o meio 2
p₁	Pressão à montante do orifício de medida
p₂	Pressão a jusante do orifício de medida
P	Porosidade do leito
Q	Vazão de água
Q_{max}	Vazão para a qual começa a ocorrer a formação do leito agregativo
S₀	Área do orifício do medidor de vazão
u(V)	Incerteza associada ao volume
u(t)	Incerteza associada ao tempo
u(Δh)	Incerteza associada a leitura do manômetro
u(k)	Incerteza associada a constante do instrumento
u(Q)	Incerteza associada a vazão
v_a	Fração volumétrica de água num meio
v_e	Fração volumétrica de esferas num meio
V	Volume de água no reservatório durante a calibração
V_a	Volume de água em um meio
V_e	Volume de esfera em um meio
x	Espessura de água atravessada pela radiação gama
y	Espessura das esferas atravessadas pela radiação gama
z	Espessura da parede atravessada pela radiação gama
Z	Cota a partir do fundo do leito onde são realizadas as medidas
Z₁	Cota da tomada de pressão tomada a montante do medidor de vazão
Z₂	Cotas da tomada de pressão tomada a jusante do medidor de vazão

LETRAS GREGAS

γ	Peso específico da água
μ	Coeficiente de atenuação linear para radiação gama
μ_a	Coeficientes de atenuação linear para a água
μ_e	Coeficientes de atenuação linear para as esferas
μ_p	Coeficientes de atenuação linear para as paredes do tubo
σ	Desvio padrão

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1	Desenho do módulo básico conforme proposto por Sefidvash, 1985	10
Figura 2.2	Desenho do módulo básico modificado onde foram realizados os experimentos	13
Figura 2.3	Corte do medidor de vazão tipo orifício	14
Figura 2.4	Reprodução da figura 7-25 de Daugherty	15
Figura 2.5	Esquema do medidor de massa específica	23
Figura 3.1	Desenho das curvas de massa específica média em função da posição onde são realizadas as medidas. Curvas para 20 kg de esferas.	29
Figura 3.2	Desenho das curvas de massa específica média em função da posição onde são realizadas as medidas. Curvas para 30 kg de esferas.	31
Figura 3.3	Desenho das curvas de massa específica média em função da posição onde são realizadas as medidas. Curvas para 40 kg de esferas.	33
Figura 4.1	Desenho dos tipos de distribuição espacial de esferas	34

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1	aferição do medidor de vazão tipo orifício	18
Tabela 3.1	Massa específica média (M_m) na direção radial medida para diversos pontos na altura do leito formado por água e 20 Kg de esferas de aço.	28
Tabela 3.2	Massa específica média (M_m) na direção radial medida para diversos pontos na altura do leito formado por água e 30 Kg de esferas de aço.	30
Tabela 3.3	Massa específica média (M_m) na direção radial medida para diversos pontos na altura do leito formado por água e 40 Kg de esferas de aço.	32
Tabela 4.1	Massa específica média (M_m) e Desvio Padrão (σ) do leito colapsado para diversas quantidades de esferas e faixa considerada para a medida.	35
Tabela 4.2	Precisão percentual e erro percentual relativo a massa específica média medida pelo método convencional em função da quantidade de esferas.	35
Tabela 4.3	Parâmetros geométricos e vazão máxima em função da quantidade total de esferas.	36

ÍNDICE DE FOTOS

Foto 2.1	Montagem inicial do experimento mostrando a diminuição do tubo da câmara de combustível	17
Foto 2.2	Medidor de vazão colocado na bancada do IPH para aferição	18

1. INTRODUÇÃO E FUNDAMENTOS

1.1. Introdução

O crescente aumento populacional no mundo, aliado ao grande desenvolvimento em todas as áreas do conhecimento, tem levado a humanidade a procurar maneiras de viver cada vez mais prósperas em termos de saúde física e mental. Uma contribuição significativa para atingir este objetivo certamente é a disponibilidade de energia, principalmente a energia elétrica.

A energia elétrica propiciou o aparecimento de diversas indústrias, facilitou a comunicação entre os povos, favoreceu o comércio, a prestação de serviços, revolucionou desde a área médica até o cotidiano do cidadão. A grande indústria do século é sem dúvida a indústria do entretenimento considerada como tal o turismo, sistemas de televisão, som etc. Todas estas atividades necessitam de energia elétrica confiável e barata.

O meio ambiente é um dos maiores fatores de bem estar do homem. Neste contexto a energia nuclear apresenta-se como uma das alternativas mais limpas [Lamarsh, 1975]. O impacto ambiental de uma central nuclear é menor que de uma central térmica convencional. De acordo com Lamarsh, 1975, temos as seguintes emissões anuais ao meio ambiente causadas por uma central elétrica de 1.000 MW de potência: *Carvão*: 100.000 toneladas de Dióxido de Enxofre (SO_2), 75.000 toneladas de Óxidos de Nitrogênio (NO_x) e 5.000 toneladas de fuligem. *Óleo de baixo teor de enxofre*: 16.000 toneladas de Dióxido de Enxofre (SO_2) e 20.000 toneladas de Óxidos de Nitrogênio (NO_x). A central nuclear não produz nenhum destes poluentes e emite apenas quantidades muito pequenas de gases radioativos.

O desenvolvimento dos reatores nucleares iniciou-se na década de 40 com o surgimento da primeira “pilha atômica”, de Fermi, que tornou-se crítica em 2 de dezembro de 1942. Após a segunda guerra mundial houve um grande investimento nesta área onde foram empregadas enormes somas em dinheiro e utilizados muitos pesquisadores nos trabalhos. Foram projetados e construídos reatores com as mais diversas finalidades: produção de Plutônio, propulsão de navios e submarinos, produção de radioisótopos para a área industrial e médica, pesquisa científica e geração de energia elétrica.

Atualmente consideram-se provadas, Lepecki, 1968, as seguintes linhas de reatores nucleares: Urânio Natural Gás Grafite, AGR (Advanced Gas Cooled Reactor), a água pesada (CANDU) e a água leve (PWR e BWR). Urânio Natural Gás Grafite, foi desenvolvido principalmente pela França e Inglaterra. Tem a vantagem de utilizar os materiais na composição isotópica em que se encontram na natureza. São de grandes dimensões e têm baixa potência específica. AGR (Advanced Gas Cooled Reactor) são reatores surgidos do aperfeiçoamento dos reatores a Urânio Natural Gás Grafite, usam Urânio levemente enriquecido, apresentam significativa diminuição no número de elementos de combustível e têm rendimento maior, dimensões menores e maior potência específica. Ambos foram desenvolvidos especialmente pela França e Inglaterra.

Os reatores moderados e refrigerados a água dividem-se em dois conceitos básicos:

- a) Água pesada: As grandes possibilidades de formação de tipos de reatores levou à dispersão de esforços e a desconfiança de que o destino era a produção de Plutônio para fins bélicos, levou ao boicote desta linha. Na atualidade praticamente apenas o Canadá é produtor. O CANDU (CANadian Deuterium Uranium).
- b) Água leve: Desenvolvido pelos Estados Unidos para a execução de reator compacto para propulsão naval. Existem duas variantes: PWR (Pressurised Water Reactor), reatores onde a água permanece líquida sob altíssima pressão e BWR (Boiling Water Reactor), reatores em que a geração de vapor é realizado no próprio reator.

Foram desenvolvidos e ainda não estão em fase comercial os reatores de alta temperatura e os rápidos produtores (Fast Breeders). Alta temperatura: HTGR (High Temperature Gas Cooled Reactor) têm a vantagem de ter alto rendimento termodinâmico ($> 50\%$) e no futuro acionar diretamente uma turbina a gás (não utilizar a água como fluido intermediário). Os rápidos produtores: São reatores onde a maioria das fissões ocorrem com neutrons rápidos que são neutrons de alta energia produzidos diretamente da fissão nuclear têm a vantagem de produzirem mais combustível do que consomem. Atualmente a França detém o desenvolvimento dos mesmos (reatores Phenix e Super Phenix).

O pensamento atual de produzir reatores compactos, eficientes, seguros e economicamente aceitáveis, tem inspirado inúmeros pesquisadores no sentido de investigar novos conceitos de reatores

Foram propostos muitos conceitos de reatores, entre eles podemos citar o de solução de combustível em moderador, de sal fundido, moderado a líquidos orgânicos, e os reatores a leito fluidizado por Morris, 1956, Sefidvash, 1985 e Mizuno, 1990.

O conceito proposto por Sefidvash inspirou a construção do experimento DEN - 01, cujo estudo hidráulico será feito neste trabalho.

1.2. Revisão bibliográfica

O conceito de reator nuclear a leito fluidizado (RNLF) foi proposto por Morris em 1956 e vários conceitos desde então foram propostas tais como as de Sefidvash, 1985, e Mizuno, 1990. A principal vantagem deste conceito seria a grande capacidade de troca de calor entre os elementos de combustível e o fluido arrefecedor, possibilitando a construção de reatores compactos de alta densidade de potência. O contato íntimo entre o elemento de combustível e o arrefecedor e a grande agitação, com a conseqüente troca de posição das esferas que ocorre no leito fluidizado, permite uma melhor uniformidade de temperatura no núcleo e reduz a possibilidade de ocorrência de pontos quentes no mesmo. Outras vantagens, também têm sido apresentadas por Sefidvash, 1985, para este tipo de reator, tais como, simplicidade de projeto, segurança inerente, economia, padronização, simplicidade de fabricação, facilidade de transporte e alta confiabilidade.

Os cálculos efetuados foram baseados nos modelos convencionais de reatores nucleares, modificados para se adaptarem ao tipo esférico de elemento de combustível. Vilhena, 1988, e Streck, 1988, analisaram este tipo de reator levando em conta a mobilidade da fronteira superior do reator, mas não consideraram a variação espacial e temporal das secções de choque macroscópicas no interior devido às modificações ocorridas na porosidade do leito em função da posição da fronteira móvel e da velocidade (vazão) do fluido arrefecedor. Rammsy, 1995, utilizou códigos comerciais para realizar cálculos da célula e da distribuição do fluxo neutrônico. Mattos, 1988, estudou a variação das densidades atômicas dos elementos constituintes do núcleo, relacionando as densidades atômicas com a porosidade. Kelly, 1961, fez um dos poucos trabalhos conhecidos relacionando o tipo de distribuidor, velocidade do fluido e porosidade para leito de partículas até $\frac{3}{4}$ de polegada e água como fluido. Borges, 1994, estudou a parte mecânica, hidráulica, térmica, neutrônica e de segurança do conceito do reator nuclear a leito fluidizado.

Borges, 1995 estudou a estabilidade de reator a leito fluidizado devido a transitórios de curto e longo tempo. Aplicou o modelo da cinética puntual para o estudo dos transitórios a curto tempo e a teoria da bifurcação para os de longo tempo. Os resultados indicaram que o reator a leito fluidizado tem comportamento similar à um convencional sob o ponto de vista de estabilidade dinâmica.

No entanto, nenhum estudo experimental foi feito sobre o comportamento da tela limitadora do leito, a influência do anel de controle sobre as características do leito, a influência do distribuidor e o estudo da variação espacial da porosidade com a vazão.

1.3. Fundamentos

Um reator nuclear pode ser considerado como um meio no qual neutrons produzem fissões de núcleos de átomos de combustível (geralmente ^{235}U) as quais por sua vez produzem novos neutrons formando assim uma reação em cadeia. As fissões, as reações nucleares, as desintegrações dos átomos e as diversas interações das radiações ocasionam a geração de calor num reator nuclear, [Lamarsh, 1975].

A tecnologia atual de reatores nucleares disponível comercialmente é a de reatores térmicos. Chama-se reator nuclear térmico àquele no qual a maioria dos neutrons que causam fissão têm energia cinética da mesma ordem da energia cinética média das moléculas do meio (neutrons e meio estão em equilíbrio térmico). Para um meio à temperatura de 20°C a energia cinética média das moléculas é de 0,025 eV. Os neutrons produzidos pelas fissões são neutrons de alta energia, média de 2 milhões de eV. Para esta energia a secção de choque de fissão, isto é, a probabilidade de interação entre neutron e núcleo com ocorrência de fissão é cerca de 400 vezes menor do que para a energia de 0,025 eV. Para aproveitar a alta secção de choque de fissão que ocorre para as baixas energias dos neutrons é necessário colocar junto com o combustível, um material de massa atômica próxima à massa dos neutrons (material leve) para que quando neutrons e núcleos se chocarem elasticamente, produzam considerável transferência de energia dos neutrons para os núcleos. Este material chama-se moderador e o processo chama-se moderação. Os moderadores mais utilizados são a água comum, água pesada e grafite (carbono). Insuficiente quantidade de moderador resulta em energia cinética dos neutrons mais alta que a necessária para o equilíbrio térmico com o meio (sub-moderação) e a probabilidade de produzir fissão diminui.

Tanto a água comum como a água pesada podem servir como moderador e arrefecedor ao mesmo tempo. É o caso do modelo proposto: O combustível (dióxido de urânio) seria colocado dentro de esferas ocas metálicas e o fluido para fluidização seria a água comum que serviria também como moderador e arrefecedor. A reação nuclear em cadeia pode ser estudada quantitativamente em termos do fator de multiplicação do meio (k_e) que é definido como a relação entre o número de neutrons de fissão de uma geração e o número de neutrons de fissão da geração anterior. Sendo $k_e = 1$ diz-se que o reator é crítico e a potência gerada é constante no tempo. Sendo $k_e > 1$ o reator é super crítico e a potência gerada cresce no tempo ao passo que se $k_e < 1$ o reator é sub crítico e a potência diminui no tempo. Na realidade, durante a operação de um reator, necessitamos que ele passe por estas 3 condições: ligar, aumentar a potência até o nível desejado e posteriormente desligar. Isto constitui o controle do reator.

O estudo da variação da quantidade de neutrons num determinado volume pode ser feito através da equação da continuidade. Para um determinado volume a taxa de variação da quantidade de neutrons é igual à taxa de produção de neutrons menos a taxa de absorção de neutrons, menos a taxa de fuga de neutrons deste volume. Assim:

$$\text{taxa de variação} = \text{taxa de produção} - \text{taxa de absorção} - \text{taxa de fuga}$$

Para um reator homogêneo as taxas de produção e de absorção de neutrons dependem da composição do reator. O tipo de material e a sua quantidade por unidade de volume é de suma importância. A taxa de fuga de neutrons depende do tipo de geometria utilizada para a construção do reator e de suas dimensões. O uso ou não de refletores de neutrons também afeta a taxa de fuga de neutrons [Lamarsh. 1975]. Pode-se fazer o controle da taxa de variação de neutrons num reator nuclear modificando-se a composição, alterando-se a geometria ou movimentando-se o refletor. Normalmente utiliza-se para o controle a variação da composição interna do reator quer por introdução e/ou retirada de absorvedores de neutrons ou por introdução e/ou retirada de combustível e em alguns casos os dois modos simultaneamente. Poucos reatores utilizam a alteração de geometria para controle.

No modelo de reator proposto, o controle seria pela utilização simultânea das duas maneiras. A composição e uma dimensão (altura do leito) alteram-se com a fluidização. Há ainda controle pelo anel absorvedor de neutrons, cuja posição não depende da fluidização.

Chama-se leito fluidizado um meio onde partículas sólidas são sustentadas por um fluido que se desloca verticalmente de baixo para cima [Borges, 1994]. A velocidade do fluido não sendo suficiente para sustentar as partículas do meio, estas permanecem no fundo do recipiente e formam um meio poroso. Este caso chama-se leito fixo e aumentando a velocidade chegar-se-á a um ponto onde o fluido apenas sustenta as partículas sólidas. Inicia-se então a formação do leito fluidizado que somente cessará de sê-lo para velocidades muito mais altas onde as partículas são arrastadas para fora do leito. Neste intervalo entre a velocidade para apenas sustentar e a velocidade mínima para arrasto das partículas temos a formação do leito fluidizado. Em velocidades acima da velocidade para apenas sustentar as partículas verifica-se que a medida em que a velocidade aumenta o leito se expande, as partículas separam-se uma das outras e passam a ter movimento livre dentro do meio. Este tipo de comportamento é denominado de particulado ou homogêneo. Para velocidades mais altas há formação de bolhas e canais, provocando grandes instabilidades. Este tipo de comportamento é chamado de agregativo ou heterogêneo.

O regime de fluidização é função das propriedades físicas das partículas (massa, tamanho, forma e rugosidade da superfície) e do fluido (massa específica, viscosidade) bem como da forma do leito, da velocidade do fluido e do tipo e dimensões do distribuidor. Dependendo das condições o leito pode apresentar pequenas bolhas de fluido, grandes regiões de vazios e aglomerados e até mesmo formar um jato. No nosso experimento suspendíamos as medidas quando iniciava a formação do jato.

1.4. Objetivos

O experimento de leito fluidizado DEN-01 foi montado com o intuito de estudar os parâmetros hidráulicos do reator nuclear a leito fluidizado proposto por Sefidvash, 1985, bem como o comportamento do leito com relação à posição da tela limitadora e também a influência do anel de controle sobre o comportamento do leito.

Salientamos a importância do presente trabalho que visa correlacionar a composição (porosidade) e a altura do leito em função da fluidização (vazão). Neste trabalho a porosidade média em cada altura foi determinada a partir da relação entre massa específica e porosidade, obtendo-se também relações entre altura do leito, vazão de fluxo de água e velocidade de fluidização. No experimento de leito fluidizado **DEN-01** pequenas esferas de aço de 8 mm de diâmetro são submetidas a um fluxo de água na direção vertical com o objetivo de fluidizar as esferas.

Utilizou-se a técnica de absorção gama para a determinação da porosidade, verificando-se portanto a homogeneidade do sistema e a altura do leito. As medidas experimentais foram feitas visando simular o módulo real. As medidas de massas específicas foram feitas utilizando-se radiação gama proveniente de uma fonte de cobalto 60 com atividade de 700 mCi. Não foram feitas medidas em função do tempo, ao contrário utilizou-se um tempo de amostragem muito superior ao período das oscilações do leito de modo a eliminar este efeito nas medidas.

No capítulo 2 descrevemos o modelo utilizado bem como as modificações que se fizeram necessárias. Descrevemos o dimensionamento do medidor de vazão e a sua aferição na Bacia de Aferição volumétrica do IPH-UFRGS. Descrevemos o desenvolvimento teórico para a medida de massa específica e o subsequente cálculo da porosidade. No capítulo 3 são apresentadas as medidas efetuadas tanto da parte convencional como da parte feita com auxílio da radiação gama e as tabelas com os valores obtidos. No capítulo 4 são feitas as análises das análises e apresentados os resultados obtidos. No capítulo 5 estão as conclusões e no capítulo 6 as sugestões para trabalhos futuros.

CAPITULO 2 - DESCRIÇÃO DO EXPERIMENTO, DA INSTRUMENTAÇÃO E CALIBRAÇÃO.

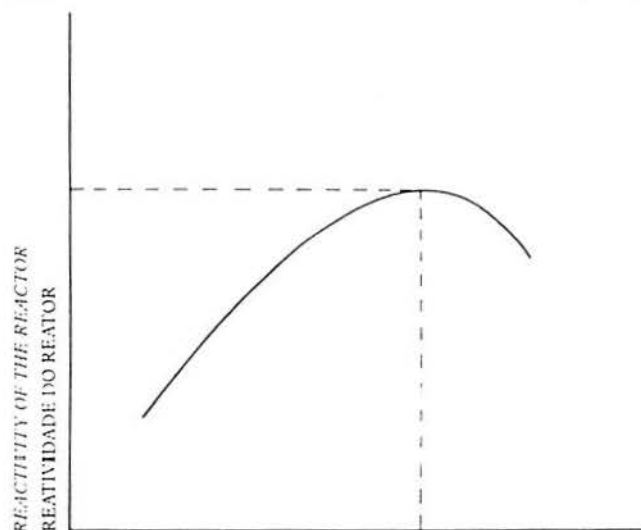
2.1. Modelo inicial

O modelo de reator nuclear a leito fluidizado proposto por Sefidvash, 1985, compreende um grupo justaposto de módulos agrupados em torno de um módulo central. O número total de módulos básicos do reator proposto é de 19, isto é, dois anéis de módulos agrupados em torno do módulo central.

O modelo do módulo básico pode ser visto na figura 2.1.

01 SUPORTE ESTRUTURAL
02 ACIONADOR HIDRAULICO
03 VÁLVULA DE DESCARGA DE COMBUSTÍVEL
04 GRAFITE
05 NÚCLEO DO REATOR
06 EIXO DO OCO DA TELA
07 DESPRESSURIZADOR
08 SAÍDA DE VAPOR
09 CONJUNTO ACIONADOR DA TELA
10 ALIMENTAÇÃO DE COMBUSTÍVEL
11 PRESSURIZADOR
12 ENTRADA DE ÁGUA
13 GERADOR DE VAPOR
14 TELA
15 ANEL ABSORVENTE
16 CARCAÇA HEXAGONAL
17 TUBO DE FLUIDIZAÇÃO
18 CARCAÇA CIRCULAR
19 CÂMARA DE COMBUSTÍVEL
20 DISTRIBUIDOR
21 PERFURAÇÕES DE ENTRADA
22 ENTRADA DE REFRIGERANTE
23 SAÍDA DE REFRIGERANTE
24 BOMBA CIRCUITO PRIMÁRIO
25 REFLETOR DE GRAFITE
26 BLINDAGEM BIOLÓGICA

01 STRUCTURAL SUPPORT
02 HYDRAULIC VALVE OPENER
03 FUEL DISCHARGE VALVE
04 GRAPHITE JACKET
05 REACTOR CORE
06 LEVEL LIMITER SHAFT
07 DESPRESSURIZER
08 STEAM EXIT
09 LEVEL LIMITER DRIVE
10 FUEL FEED
11 PRESSURIZER
12 WATER ENTRANCE
13 STEAM GENERATOR
14 LEVEL LIMITER
15 ABSORBER SHELL
16 HEXAGONAL CHANNEL
17 FLUIDIZATION TUBE
18 CIRCULAR CHANNEL
19 FUEL CHAMBER
20 DISTRIBUTOR
21 ENTRANCE PERFORATIONS
22 COOLANT ENTRANCE
23 COOLANT EXIT
24 PRIMARY PUMP
25 GRAPHITE REFLECTOR
26 BIOLOGICAL SHIELD



ALTURA OU POROSIDADE DO LEITO FLUIDIZADO
HEIGHT OR POROSITY OF THE FLUIDIZED BED

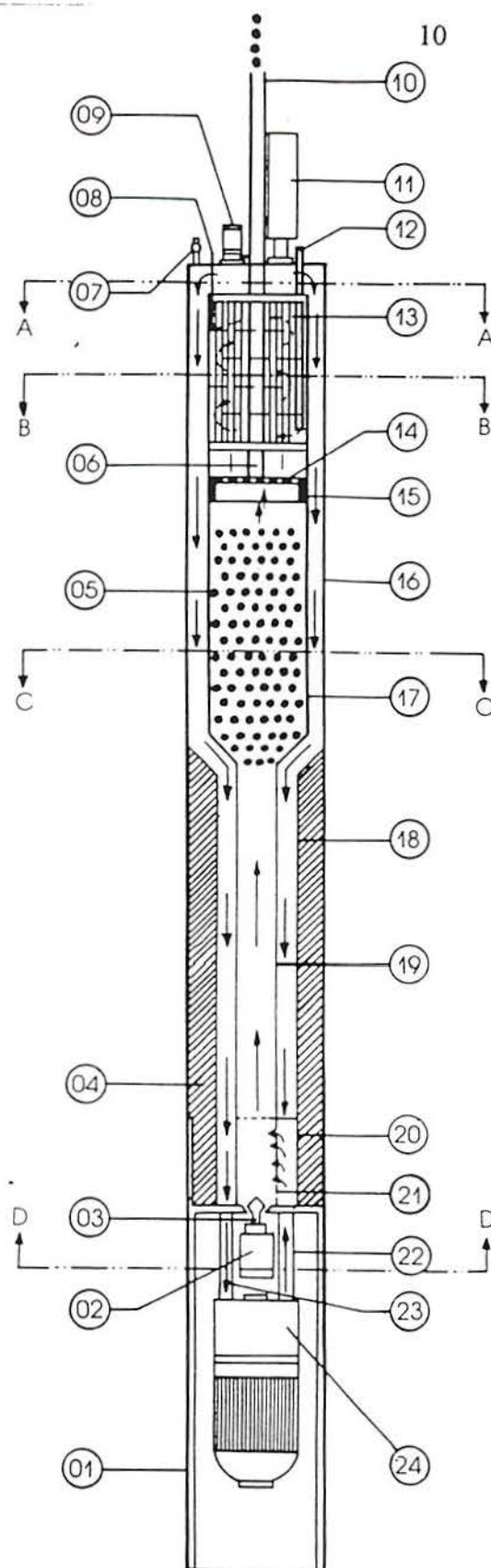
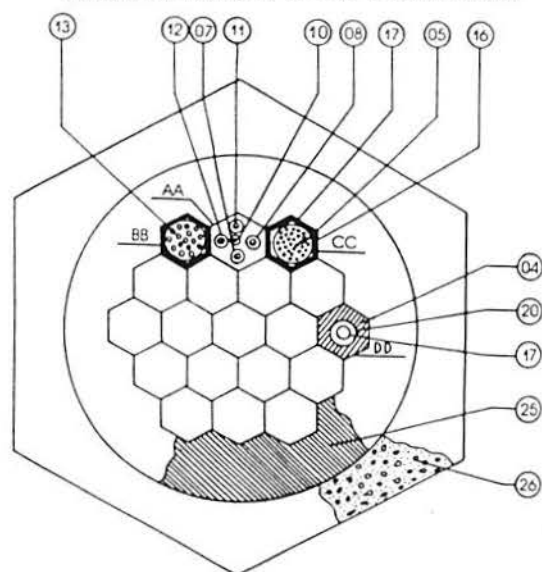


Figura 2.1 – Desenho do módulo básico conforme proposto por Sefidvash, 1985

Para facilidade de entendimento deste trabalho descreveremos algumas partes:

Câmara de Combustível: Um tubo de 100 mm de diâmetro onde ficam as esferas de combustível quando o reator não está em operação. **Núcleo:** Um tubo de 250 mm de diâmetro onde deve ser feita a fluidização para a geração de energia. **Distribuidor:** Acoplamento entre a Câmara de Combustível e o Núcleo e que deve facilitar a fluidização. **Anel de Controle:** Feito de material absorvedor de neutrons serve para o controle do reator. **Tela Limitadora:** Uma tela fixa ao Anel de Controle serve para limitar a altura de fluidização.

Considerando o objetivo do trabalho de determinar alguns parâmetros do módulo básico, procurou-se construir um sistema hidráulico semelhante ao proposto. Como se trata de uma concepção que ainda se encontra em fase conceitual, surgiram dificuldades por indefinições de alguns detalhes técnicos. Além dos diâmetros da Câmara de Combustível e Núcleo nada mais estava detalhado ou dimensionado, motivo pelo qual procurou-se construir um modelo conforme o projeto conceitual disponível e simulando o combustível com esferas de aço.

2.2. Desenvolvimento do modelo

Este item discute as modificações que foram realizadas a partir do modelo proposto a fim de corrigir problemas operacionais decorrentes de condições não previstas no modelo inicial. Iniciamos com a constatação de que as esferas compactadas na Câmara de Combustível formaram um meio poroso de difícil circulação de água, produzindo uma grande perda de carga. Com as bombas disponíveis não foi possível produzir um fluxo de água suficientemente capaz de arrastar as esferas para o núcleo. Havia a necessidade de uma bomba de altíssima pressão a qual não dispúnhamos. Alterou-se então o modelo para que as esferas formassem apenas 100 mm de altura no tubo de 100 mm de diâmetro ficando o restante das mesmas no tubo de 250 mm de diâmetro.

Com a nova configuração foi possível, com a bomba disponível, elevar todas as esferas para o tubo de 250 mm de diâmetro. A fluidização obtida foi do tipo jato, em que as esferas do centro são lançadas para cima e as da periferia permanecem praticamente paradas. Evidentemente esta situação não era compatível com o modelo conceitual [Sefidvash, 1985]. Como não era objetivo fundamental do trabalho desenvolver um Distribuidor, optou-se por alterar o modelo fazendo-se apenas um tubo de 250 mm de diâmetro, de maior comprimento e com grade de alumínio perfurada para sustentar as esferas. Além disso tínhamos que diminuir o efeito de turbulência ocasionado pela bomba e tornar o perfil de velocidades mais uniforme.

Experimentalmente [Daugherty] sabe-se que é necessária uma distância de cerca de 100 diâmetros a partir do ponto que origina uma perturbação no fluido para que esta perturbação possa ser considerada desprezível. Um tubo com 250 mm de diâmetro deveria ter então um comprimento de tubulação antes do local da fluidização de 25 m. O atendimento a esta necessidade tornaria impossível o experimento por absoluta falta de condições de construção vertical. Optou-se então, pela construção de um sistema de tubulação horizontal com diâmetro de 80,8 mm, onde haveria maior diminuição da turbulência provocada pela bomba e serviria também para a instalação do sistema de medida de vazões seguido por uma tubulação de 250 mm de diâmetro. A tubulação de maior diâmetro tinha um trecho horizontal seguido de uma curva de raio longo conectado ao trecho vertical indo até o local de fluidização. Para diminuir o efeito das turbulências provocadas pelas mudanças de diâmetro da tubulação e mudanças de direção do fluxo, colocamos placas de alumínio perfuradas antes e depois da curva.

Essas modificações permitiram o seguimento do experimento, buscando verificar como se comportava a fluidização com diversas cargas de esferas (20 kg, 30 kg e 40 kg) e para diversas alturas do leito limitadas pela Tela Limitadora. Iniciado o trabalho experimental verificou-se que as esferas que ganhavam maior velocidade projetavam-se sobre a tela onde ficavam aprisionadas. Junto à tela, a velocidade da água é maior devido ao estrangulamento produzido pelos arames da tela e principalmente pelo suporte da mesma. O aprisionamento de esferas aumentava cada vez mais, pois a cada esfera aprisionada correspondia uma diminuição da área de fluxo. O processo cessava quando, na parte superior do tubo, se formava um leito compactado, afastado do leito original que por sua vez também ficava compactado.

Resolveu-se, assim, retirar a Tela Limitadora pois da maneira como foi concebida tornava impraticável a fluidização. Com a remoção da Tela Limitadora surgiu outro problema: o Anel de Controle, construído com alumínio de 2 mm de espessura, ao ser introduzido na região das esferas fluidizadas, provocava um estrangulamento da veia líquida e aumentava a velocidade do fluido dentro do Anel. Como resultado deste processo havia um sugamento das esfera da parte inferior do anel para a parte superior do mesmo dividindo o leito em duas partes. A medida em que o anel era introduzido, o leito inferior era diminuído até praticamente se esgotar, transferindo quase todas as esferas para a parte superior do Anel onde o processo de fluidização prosseguia à semelhança do anteriormente ocorrido na parte inferior. Concluímos que o controle por meio de um anel colocado dentro do leito devia ser reestudado e optamos por retirar também o Anel de Controle.

2.3. Modelo utilizado

Com as modificações propostas o sistema ficou bastante simplificado. Consistiu de um tubo de fluidização de 250 mm de diâmetro no interior do qual esferas de aço de 8 mm de diâmetro fluidizam em água à temperatura ambiente que circula em circuito fechado, impulsionados por uma bomba hidráulica. Fazem parte, do circuito fechado, um registro para ajuste da vazão, medidor de vazão tipo placa de orifício, um distribuidor (placa de alumínio perfurada), uma derivação (“T”) para a introdução e retirada das esferas e tanque de armazenamento de água. A figura 2.2 representa o modelo hidráulico utilizado.

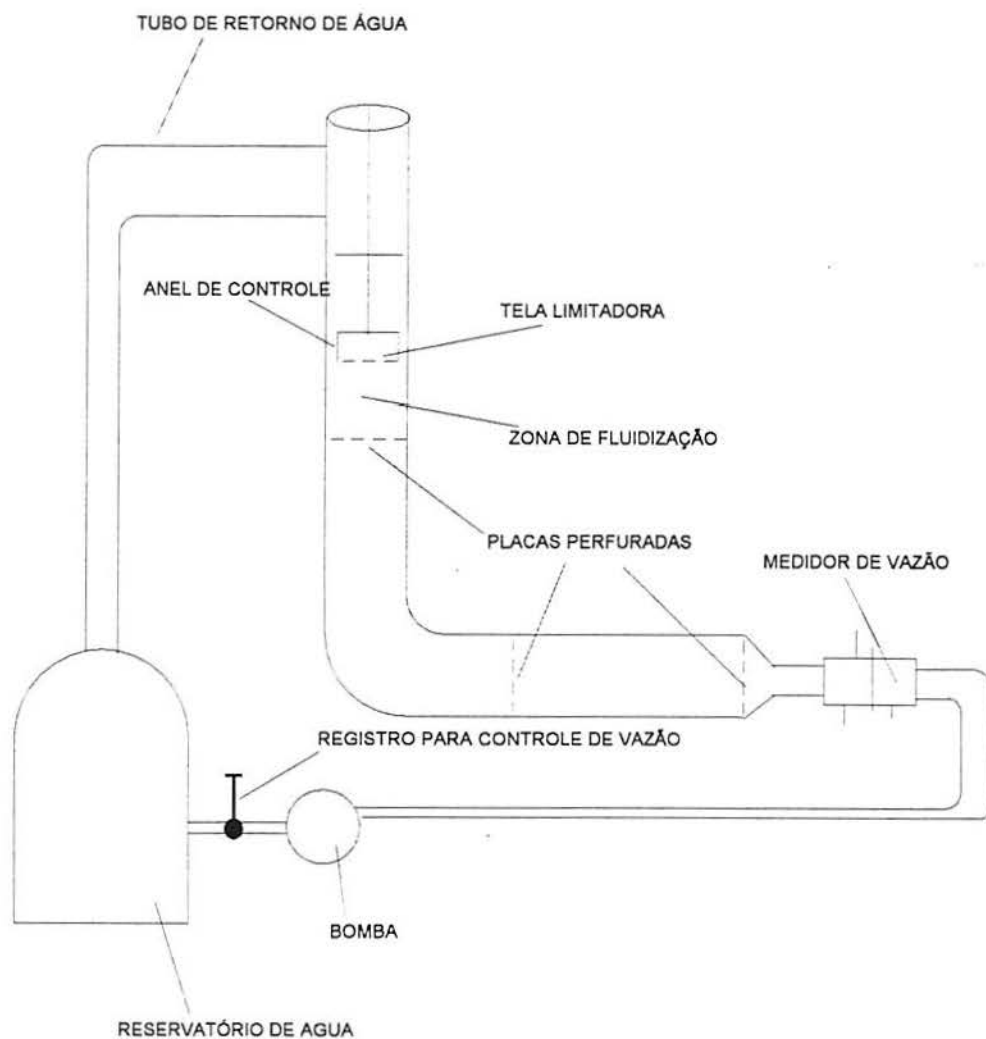


Figura 2.2 – Desenho do módulo básico modificado onde foram realizados os experimentos.

2.4. Medidor de vazão

A medida de vazão da água é muito importante para o trabalho desenvolvido. Trabalhos experimentais feitos anteriormente num modelo semelhante a este, utilizavam rotâmetros como medidores de vazão (foram usados 3 rotâmetros em paralelo com faixas de medida diferentes) ou 1 hidrômetro como integrador do fluxo de água. Estes medidores não deram bons resultados, pois não atendiam a enorme faixa de variação de vazão bem como tinham baixa precisão e apresentavam altas perdas de carga. O medidor deveria medir vazões de 4 a 40 litros por segundo com precisão em torno de 1%. Optou-se, então, por construir um medidor tipo orifício que é de fácil execução e apresenta relativamente baixa perda de carga. O desenho do medidor é apresentado na figura 2.3.

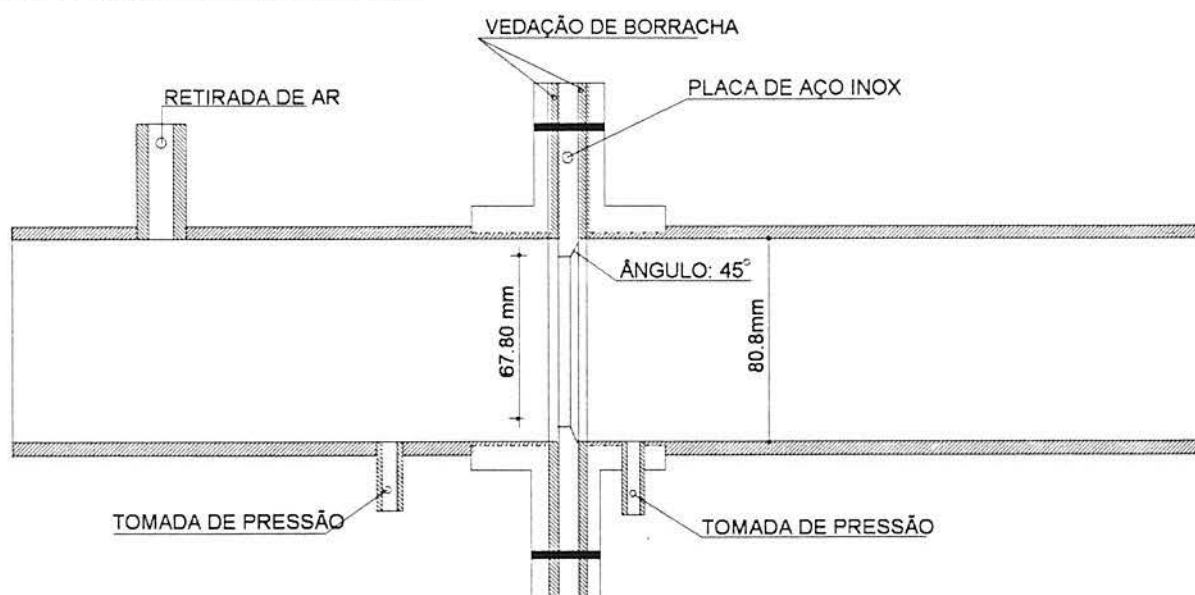


Figura 2.3 – Corte do medidor tipo orifício

A expressão básica para o dimensionamento do orifício segundo Daugherty, é a seguinte:

$$Q = \frac{C \cdot S_0}{(1 - (D_0 / D_1)^4)^{1/2}} \cdot (2 \cdot g \cdot h)^{1/2} \quad 2.1$$

Onde C representa o coeficiente de vazão, D_0 o diâmetro do orifício em metros, D_1 o diâmetro do conduto em metros, S_0 a área do orifício em metros quadrados, g a aceleração da gravidade ($9,8 \text{ m/s}^2$) e h a diferença de pressão estática.

O coeficiente de vazão C é obtido através da figura 7.25 de Daugherty a qual está reproduzida na figura 2.4:

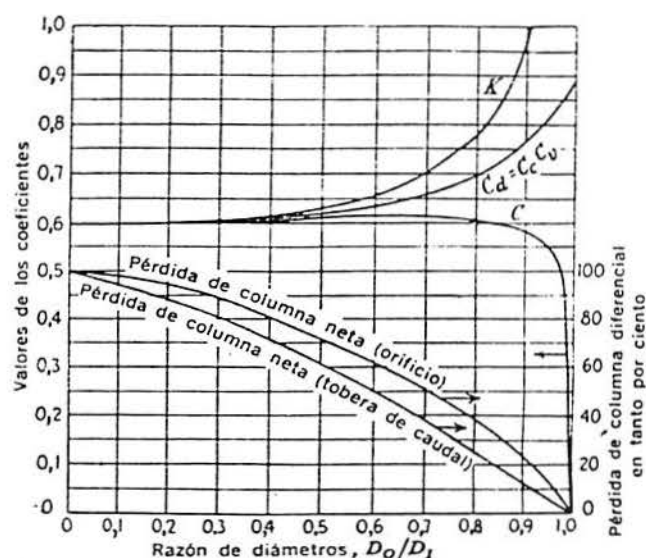


FIG. 7-25. Coeficientes para el orificio medidor en pared delgada, con el diferencial de presión medido, sea en las bridas, sea en la vena contracta. También se da la pérdida de columna a través de un orificio y de la tobera de caudal. Todas las curvas son válidas para $N_R (D_1 V_1 \rho / \mu) > 10^5$

Figura 2.4 - Reprodução da figura 7-25 de Daugherty

A diferença de pressão estática é calculada pela seguinte expressão:

$$h = [Z_1 + (p_1 / \gamma)] - [Z_2 + (p_2 / \gamma)] \quad 2.2$$

Onde Z_1 e Z_2 representam a cota do eixo de secção a montante e a jusante que contém as tomadas de pressão, p_1 e p_2 as pressões a montante e a jusante do orifício e γ o peso específico da água.

Para o medidor na horizontal $Z_1 = Z_2$.

Usando-se mercúrio no manômetro diferencial e o medidor na posição horizontal, a expressão da diferença de pressão estática poderá ser substituída por:

$$h = (d_m - 1) \Delta h \quad 2.3$$

Como $d_m = 13,6 \text{ g/cm}^3$, massa específica do mercúrio, temos:

$$h = 12,6 \Delta h \quad 2.4$$

Nestas expressões Δh representa a diferença de pressão em milímetros de mercúrio.

O orifício poderá ter qualquer diâmetro, entretanto existe um compromisso entre a precisão (relacionada com a diferença de desnível de mercúrio) e a perda de carga ocasionada pelo estrangulamento da veia líquida. Optou-se por uma relação de diâmetros $(D_0/D_1) = 0,84$.

A tubulação tem diâmetro de 0,0808 m e com a relação entre diâmetros de 0,84, temos para o orifício o valor de 0,0678 m.

Combinando a equação (2.1) com a (2.4) e englobando todos os valores numa constante K , constante do instrumento, temos para a expressão da vazão:

$$Q = k (\Delta h)^{1/2} \quad 2.5$$

Podemos determinar teoricamente a constante k do instrumento entrando na equação 2.1 os seguintes valores: $C = 0,6$ (conforme a figura 2.4), $S_0 = (\pi D_0^2) / 4$, $(D_0/D_1) = 0,84$, $D_0 = 0,0678$, $g = 9,81$ e $h = 12,6 \Delta h$

Fazendo-se os cálculos obtemos o valor de $k = 0,0480$, para obtermos a vazão Q em metros cúbicos por segundo, entrando-se Δh em metros de coluna de mercúrio. Multiplicando este valor por 1000 teremos a vazão em litros por segundo. Assim temos uma constante $k = 48,0$ considerando a vazão em litros por segundo.

O valor da constante do instrumento, k , também foi determinado experimentalmente na Bacia de Aferição Volumétrica do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da UFRGS, fixando-se uma diferença de altura de coluna de mercúrio no manômetro diferencial e medindo-se o tempo necessário para elevar o nível do reservatório de área constante (10 m^2) até um determinado valor. As alturas dos diversos níveis de água foram medidas com uma ponta linimétrica. As fotos 2.1 e 2.2 mostram a montagem realizada.

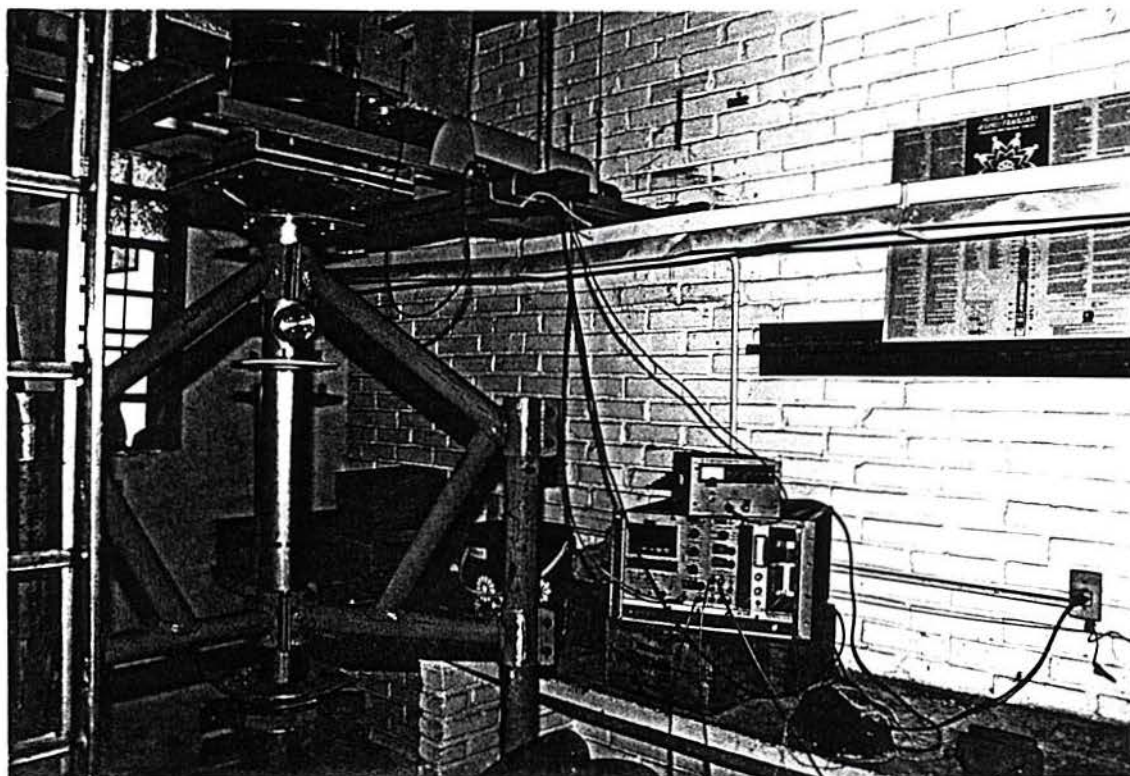


Foto 2.1 - Montagem inicial do experimento mostrando a diminuição do tubo da câmara de combustível

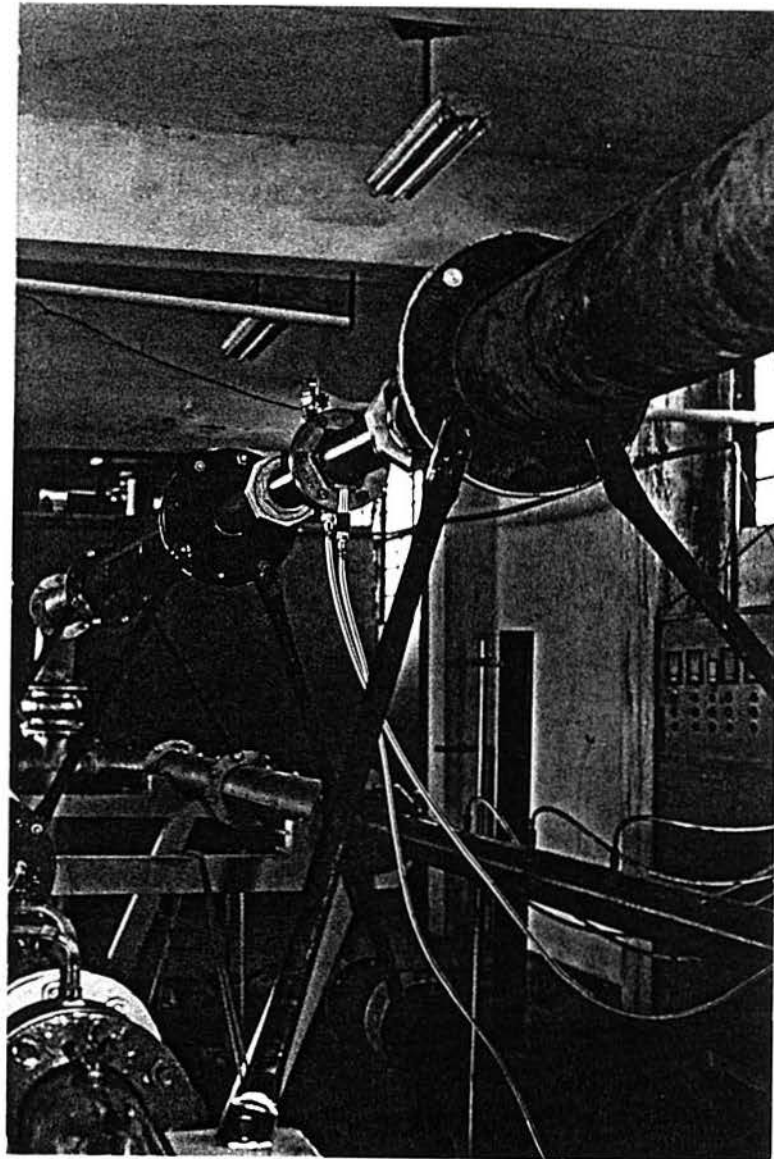


Foto 2.2 – Medidor de vazão colocado na bancada do I.P.H. para aferição

Os valores obtidos foram os da tabela 2.1.

Δh de Hg (m)	Varição da altura do reservatório (mm)	tempo (s)	vazão (l/s)	k
0,240	0,8554	364	23,50	47,97
0,179	0,8797	430	20,45	48,33
0,094	0,6455	434	14,87	48,50
0,037	0,2830	302	9,37	48,71
0,011	0,4786	931	5,14	49,00

TABELA 2.1: Aferição do medidor de vazão tipo orifício

O valor médio da constante do instrumento foi de $k = 48,50$, com desvio padrão $S = 0,388$, ficando a expressão para a vazão na seguinte forma:

$$Q = 48,50 (\Delta h)^{1/2} \quad 2.6$$

A discrepância obtida entre o valor teórico calculado e o experimental foi de $(48,5 - 48,0) / 48,5 = 0,010$ ou 1,0 %. Esta discrepância pode ser atribuída ao valor da constante C retirado de gráfico, valores das dimensões físicas do orifício e tubulação, o posicionamento das tomadas de pressão e rugosidade das paredes.

2.4.1. Perda de carga

A perda de carga em um orifício pode ser determinada com auxílio da figura 2.5 para $(D_0/D_1) = 0,84$:

$$h_p = 0,33 h = 0,33 (12,6) \Delta h \quad 2.7$$

$$h_{p(\text{metros água})} = 4,16 \Delta h \text{ (m de Hg)} \quad 2.8$$

$$h_{p(\text{metros água})} = 0,00416 \Delta h \text{ (mm de Hg)} \quad 2.9$$

Na maior vazão ocorre a maior perda de carga. Para uma vazão de 30 litros por segundo teremos uma diferença de pressão de $\Delta h = (Q / 48,6)^2 = 0,38$ metros de mercúrio o que dará uma perda de 1,58 metros de coluna de água.

2.4.2. Determinação da incerteza nas medidas

A incerteza na determinação da vazão com este instrumento está relacionada com a incerteza na avaliação da constante do instrumento k e a incerteza na determinação do desnível no manômetro de mercúrio Δh . Por sua vez a incerteza na constante do instrumento está relacionada com as incertezas no volume determinado, no tempo medido e no desnível no manômetro de mercúrio.

Considerando a expressão que determinou experimentalmente a constante do instrumento $k = [V/t] \Delta h^{-1/2}$. A incerteza k é dada por (ISO/WD 5168.2, 1995):

$$u(k) = \sqrt{(c_V u(V))^2 + (c_t u(t))^2 + (c_{\Delta h} u(\Delta h))^2} \quad 2.10$$

Nesta expressão C_V , C_t e $C_{\Delta h}$ representam os coeficientes de sensibilidade que são definidos como a taxa de variação da saída (k) em relação as quantidades de entrada V , t e Δh , respectivamente. $u(V)$, $u(t)$ e $u(\Delta h)$ representam as incertezas associadas ao volume, ao tempo e a leitura no manômetro. $u(k)$ representa a incerteza na determinação de k .

$$c_V = \frac{\partial k}{\partial V} = \frac{\Delta h^{-\frac{1}{2}}}{t} \quad 2.11$$

$$c_t = \frac{\partial k}{\partial t} = \frac{-V \Delta h^{-\frac{1}{2}}}{t^2} \quad 2.12$$

$$c_{\Delta h} = \frac{\partial k}{\partial \Delta h} = \frac{-V \Delta h^{-\frac{3}{2}}}{2 t} \quad 2.13$$

Considerando que a incerteza na medida do volume é de $\pm 0,01V$ ou $\pm 1\%$ (dado pelo IPH-UFRGS), que a incerteza na medição do tempo seja de 3 segundos em 364 segundos (menor tempo medido), ou seja de $\pm 0,82\%$ e que a incerteza na medida da coluna manométrica de $\pm 0,001$ metros, temos que:

$$u(k) = \sqrt{\left(\frac{\Delta h^{-\frac{1}{2}}}{t} \cdot 0,01 V\right)^2 + \left(\frac{-V \Delta h^{-\frac{1}{2}}}{t^2} \cdot 0,0082 t\right)^2 + \left(\frac{-V \Delta h^{-\frac{3}{2}}}{2 t} \cdot 0,001\right)^2} \quad 2.14$$

$$u(k) = \frac{V \Delta h^{-\frac{1}{2}}}{t} \cdot \sqrt{(0,01)^2 + (0,0082)^2 + \left(\frac{0,001}{4 \Delta h}\right)^2} \quad 2.15$$

Para a vazão mínima temos que $\Delta h = 0,011 \text{ m}$, portanto a incerteza é de $u(k) = \pm 0,026 \text{ k}$, ou seja de $\pm 2,6\%$. Para a vazão máxima temos que $\Delta h = 0,240 \text{ m}$, portanto a incerteza é de $u(k) = \pm 0,013 \text{ k}$, ou seja de $\pm 1,3\%$.

Agora podemos determinar a incerteza nas medidas efetuadas com o instrumento. Utilizando a expressão $Q = k \Delta h^{1/2}$, temos que a incerteza é dada por (ISO/WD 5168.2, 1995):

$$u(Q) = \sqrt{(c_k u(k))^2 + (c_{\Delta h} u(\Delta h))^2} \quad 2.16$$

Nesta expressão C_k e $C_{\Delta h}$ representam os coeficientes de sensibilidade para as quantidades de entrada k e Δh , respectivamente. $u(k)$ e $u(\Delta h)$ representam as incertezas associadas a constante do instrumento e a leitura no manômetro. $u(Q)$ representa a incerteza na determinação de Q .

$$c_k = \frac{\partial Q}{\partial k} = \Delta h^{\frac{1}{2}} \quad 2.17$$

$$c_{\Delta h} = \frac{\partial Q}{\partial \Delta h} = -\frac{k \cdot \Delta h^{\frac{-1}{2}}}{2} \quad 2.18$$

A incerteza da constante do instrumento já foi determinada anteriormente e a incerteza na leitura do manômetro, como visto anteriormente é de $\pm 0,001$ metros. Temos então

$$u(Q) = \sqrt{\left(\Delta h^{\frac{1}{2}} u(k)\right)^2 + \left(\frac{-k \Delta h^{\frac{-1}{2}}}{2} \cdot 0,001\right)^2} \quad 2.19$$

$$u(Q) = k \Delta h^{\frac{1}{2}} \cdot \sqrt{\left(\frac{u(k)}{k}\right)^2 + \left(\frac{0,001}{4 \Delta h}\right)^2} \quad 2.20$$

Para a vazão mínima temos que $\Delta h = 0,011 \text{ m}$ e a incerteza é de $u(k) = \pm 0,026 k$. Para a vazão máxima temos que $\Delta h = 0,240 \text{ m}$ e a incerteza é de $u(k) = \pm 0,013 k$. Entrando com estes valores na expressão acima temos que para a vazão mínima $u(Q) = \pm 0,034 Q$ ou $\pm 3,4 \%$ e para a vazão máxima $u(Q) = \pm 0,013 Q$ ou $\pm 1,3 \%$.

2.5. Medidor de massa específica

As medidas de massa específica pela técnica de radiações gama envolve um dispositivo em que de um lado coloca-se a fonte radioativa devidamente colimada e do outro lado um detector de radiação também colimado com a fonte. O material do qual se quer determinar a massa específica fica colocado entre a fonte e o detector, [Kohl].

O desenho esquemático do medidor de massa específica pode ser visto na figura 2.5.

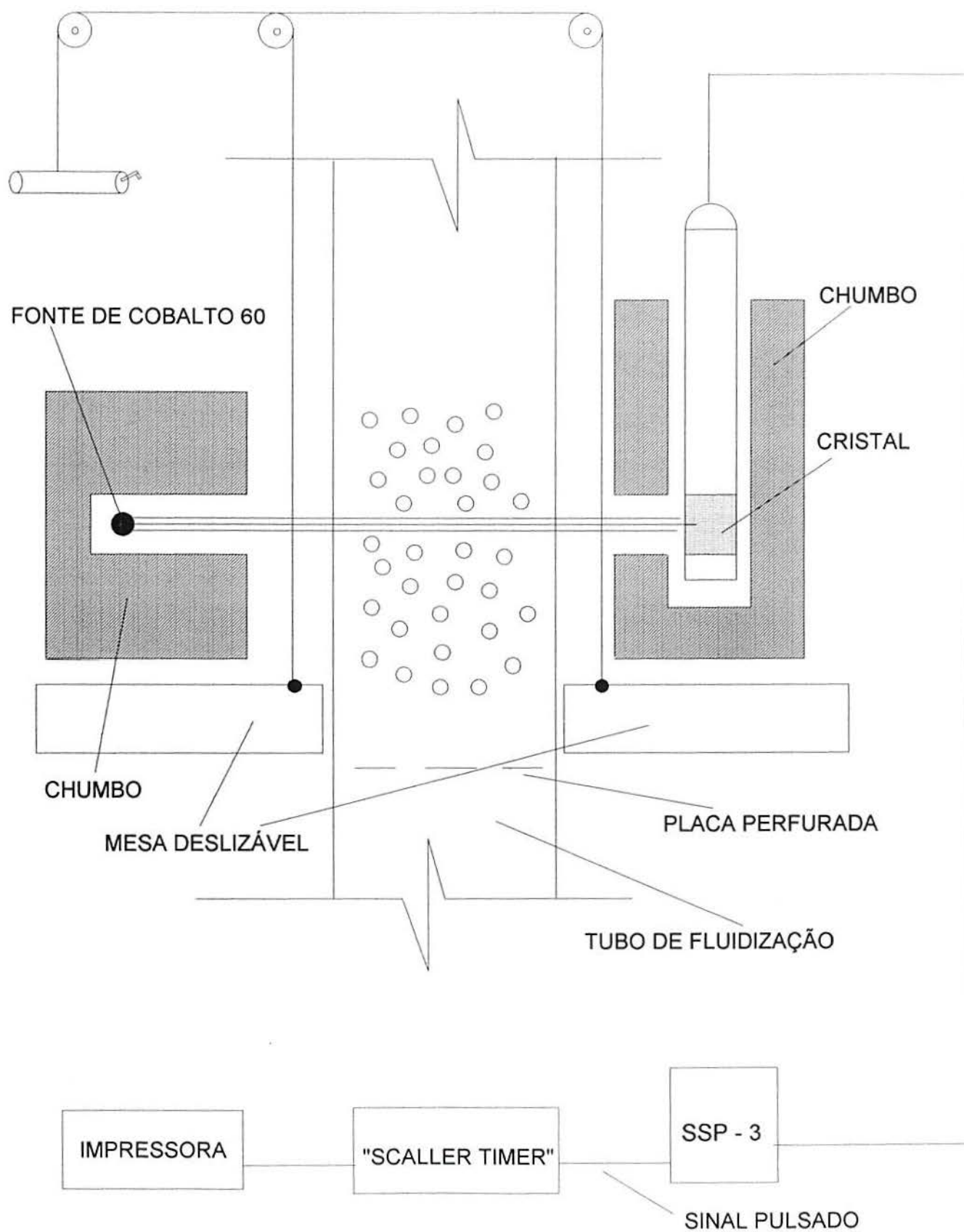


Figura 2.5 – Esquema do medidor de massa específica

Nesta figura uma fonte de cobalto 60 é colimada de tal modo que o feixe útil fique em direção ao leito a ser medido. No lado oposto do leito é colocado um detector cintilador de NaI (TI), devidamente colimado. O detector de NaI (TI) é de alta sensibilidade e permite alta taxa de detecção, [Knol, 1979]. Um sistema mecânico comandado por um sarilho possibilita o deslocamento simultâneo de fonte e detector ao longo do leito fluidizado de modo a realizar medidas a diversas alturas do leito.

O detector utilizado foi a sonda cintilométrica e o aparelho de marca Srat, modelo SPP-3, especialmente desenvolvidos para trabalhos com radioisótopos. Este aparelho possui um discriminador de altura de pulsos permitindo que se escolha a partir de que energia de fótons se quer contar. Possui saída em forma de pulso elétrico (cada pulso elétrico corresponde a detecção de um fóton de energia superior ao valor escolhido no discriminador). A saída dos pulsos foi levada a um contador com base de tempo associada ("scaler timer") que contava o número de pulsos durante o tempo de amostragem. O tempo de amostragem foi determinado como bem superior ao período de oscilação do leito. Como o período de oscilação do leito era da ordem dos segundos, optou-se por medidas em amostragem de 30 segundos.

A saída do contador era levada a uma impressora onde a quantidade de fótons medida era impressa para facilidade do usuário.

O princípio das medidas baseia-se no fato de que um feixe de radiação gama monoenergética ao atravessar um meio qualquer, sofre atenuação na intensidade segundo a seguinte expressão [Lamarsh, 1975]:

$$I = I_0 (B_a \cdot \varepsilon^{-\mu_a \cdot x}) \cdot (B_e \cdot \varepsilon^{-\mu_e \cdot y}) \cdot (B_p \cdot \varepsilon^{-\mu_p \cdot z}) \quad 2.21$$

Nesta expressão I representa a intensidade do feixe gama medido com os diversos materiais entre a fonte e o detector; I_0 a intensidade sem qualquer material entre a fonte e detector, B_a , B_e e B_p , os fatores de "build-up" para a água, esferas e parede; μ_a , μ_e e μ_p os coeficientes de atenuação linear para água, esferas e paredes; x , y e z as respectivas espessuras destes materiais.

A equação (2.21) pode ser simplificada agrupando-se a atenuação das paredes em um único fator k_p , fazendo :

$$k_p = (B_p \cdot \varepsilon^{-\mu_p \cdot z}) \quad 2.22$$

Então a expressão 2.21 toma a forma:

$$I = I_0 \cdot k_p \cdot (B_a \cdot \varepsilon^{-\mu_a \cdot x}) \cdot (B_e \cdot \varepsilon^{-\mu_e \cdot y}) \quad 2.23$$

Dividindo-se e multiplicando-se os expoentes pelas respectivas massas específicas temos:

$$I = I_0 \cdot k_p \cdot B_a \cdot B_e \cdot \varepsilon^{-(\mu_a \cdot da/da \cdot x)} \cdot \varepsilon^{-(\mu_e \cdot de/de \cdot y)} \quad 2.24$$

Nesta equação d_a e d_e representam as massas específicas da água e das esferas.

Para as energias dos fótons de radiação gama emitidos pelo cobalto 60, fonte utilizada, a relação entre os coeficientes de atenuação linear μ e as respectivas massas específicas d é constante e independe dos materiais. Neste caso podemos por em evidência e a equação (2.24) fica:

$$I = I_0 \cdot k_p \cdot B_a \cdot B_e \cdot \varepsilon^{-(\mu/d)} \cdot \varepsilon^{-(x \cdot da + y \cdot de)} \quad 2.25$$

Multiplicando-se e dividindo-se o expoente por l , a espessura do leito fluidizado, temos:

$$I = I_0 \cdot k_p \cdot B_a \cdot B_e \cdot \varepsilon^{-(\mu/d) \cdot l} \cdot \varepsilon^{-(x \cdot da + y \cdot de) / l} \quad 2.26$$

Considerando que os fatores de “build-up” não se alteram com as modificações que ocorrem no leito (isto é obtido colimando a fonte e o detector) temos, agrupando os fatores constantes num único fator k_t

$$I = k_t \cdot \varepsilon^{-(x \cdot da + y \cdot de) / l} \quad 2.27$$

O termo no expoente representa a massa específica do meio M_m (basta multiplicar e dividir pela área do feixe).

$$I = k_t \cdot \varepsilon^{-M_m} \quad 2.28$$

Esta expressão nos permite determinar a massa específica do leito fluidizado em função da intensidade do feixe de fótons que atravessa o meio. Nesta expressão k_t representa a constante do instrumento.

Fazendo duas medidas de intensidade com porosidade diferente uma da outra, temos:

$$I_1 = k_t \cdot \varepsilon^{-M_1} \quad 2.29$$

$$I_2 = k_t \cdot \varepsilon^{-M_2} \quad 2.30$$

Dividindo-se membro a membro as equações (2.29) e (2.30), temos:

$$(I_1 / I_2) = \varepsilon^{-(M_1 - M_2)} \quad 2.31$$

Aplicando o logaritmo neperiano e rearranjando os termos, temos:

$$M_2 = M_1 + \ln (I_1 / I_2) \quad 2.32$$

Utilizando a água como referência ($M_m = M_1 = 1 \text{ g/cm}^3$) e determinando a intensidade I_1 do feixe que atravessa a água podemos determinar M_2 medindo-se I_2 .

2.6. Determinação da porosidade

A porosidade do leito fluidizado é definida como a relação entre o volume de água e o volume total (volume de água mais o volume das esferas), sendo dada por

$$P = V_a / (V_a + V_e) \quad 2.33$$

onde:

P = porosidade do leito

V_a = volume de água

V_e = volume de esferas.

Dividindo-se por V_a , temos:

$$P = 1 / [(1 + V_e / V_a)] \quad 2.34$$

Por outro lado a massa específica do leito é determinada pela relação entre a soma das massas de esferas e água, pela soma dos volumes de esferas e água. Assim tem-se:

$$M_m = (m_e + m_a) / (V_e + V_a) \quad 2.35$$

Onde m_e e m_a representam a massa de esferas e de água, respectivamente.

Na equação (2.35) se substituirmos as massas de esferas e de água pelos produtos de seus volumes pelas massas específicas correspondentes, teremos a seguinte expressão:

$$(V_e / V_a) = (M_m - d_a) / (d_e - M_m) \quad 2.36$$

Substituindo a relação volumétrica da equação (2.36) na equação (2.34), chegamos na relação entre a porosidade e a massa específica do leito fluidizado:

$$P = (d_e - M_m) / (d_e - d_a) \quad 2.37$$

Considerando a massa específica da água igual a 1 g/ cm³ e das esferas de 7,86 g/cm³ (ferro), a porosidade poderá ser determinada pela relação:

$$P = (7,86 - M_m) / 6,86 \quad 2.38$$

Desta forma, medindo-se a massa específica (M_m) do leito pode-se estimar a porosidade em cada ponto de medida realizada, usando a equação (2.38).

3. MEDIDAS EXPERIMENTAIS

3.1. Massa específica e porosidade por método convencional

Inicialmente fez-se a medida convencional da massa específica do leito colapsado. Tomou-se um vasilhame e fez-se a pesagem que forneceu 260g. Em seguida encheu-se de água e fez-se nova pesagem fornecendo desta vez 2.730 g. O volume interno foi calculado :

$$\text{volume interno} = (2.730 \text{ g} - 260 \text{ g}) / 1 \text{ g/ml} = 2.470 \text{ ml} \quad 3.1$$

A massa específica do leito colapsado foi obtida da seguinte maneira: Tomou-se o vasilhame descrito acima, encheu-se de esferas de aço e após completou-se o volume com água. Feita a pesagem final obteve-se uma massa de 11.900 g. Descontando-se a massa do vasilhame, temos uma massa de leito (esferas mais água) de $11.900 \text{ g} - 260 \text{ g} = 11.640 \text{ g}$. Portanto a massa específica do leito colapsado é de :

$$M_m = 11.640 \text{ g} / 2.470 \text{ ml} = 4,71 \text{ g/ml ou} \quad 3.2$$

$$M_m = 4,71 \text{ g/cm}^3 \quad 3.3$$

Utilizando a equação (2.38) determinamos a porosidade para esta massa específica:

$$P = (7,86 - 4,71) / 6,86 = 0,459 \quad 3.4$$

3.2. Geometria do tubo de fluidização

O tubo onde foram realizados os experimentos era de acrílico transparente para permitir a visualização da fluidização. A parede era de 4 mm de espessura.

O comprimento da circunferência externa do tubo era de 822 mm o que correspondia a um diâmetro externo de 261,6 mm. Considerando-se a espessura da parede, teremos para diâmetro interno 253,6 mm. Isto corresponde uma área transversal de 50.511 mm^2 .

3.3. Medidas realizadas com atenuação de raios gama

Para as medidas de massas específicas médias no sentido radial foram utilizados grupos de esferas de aço com massas totais de 20 Kg, 30 Kg e 40 Kg. Para cada quantidade de esferas levava-se a fluidização até onde iniciava a instabilidade do leito, com a tendência para a formação de jato.

As medidas foram realizadas de centímetro em centímetros a partir da base do leito (cota zero) até a altura onde havia somente água.

Tendo-se as medidas das transmissões do feixe de raios gama, determinamos a massa específica média com ajuda de equação (2.32) e da porosidade com a equação (2.38).

O resultado das medidas efetuadas estão indicadas nas tabelas (3.1), (3.2), (3.3).

Em todas as tabelas **Q** representa a vazão de água em l/s, **Z** a cota a partir da base do leito em cm, **M_m** a massa específica média do leito em g/cm³, e **P** a porosidade média naquela cota. A vazão de zero l/s corresponde ao leito colapsado.

Q [l/s]	0		11.6		16.6	
Z	M_m	P	M_m	P	M_m	P
0	3,608	0,620	3,047	0,702	2,947	0,716
1	4,282	0,522	3,504	0,635	3,263	0,670
2	4,504	0,489	3,784	0,594	3,606	0,620
3	4,612	0,473	3,939	0,572	3,764	0,597
4	4,612	0,473	3,956	0,569	3,852	0,584
5	4,656	0,467	3,960	0,569	3,912	0,576
6	4,656	0,467	3,960	0,569	3,916	0,577
7	4,623	0,472	3,993	0,564	3,906	0,576
8	4,646	0,469	3,960	0,569	3,843	0,586
9	4,646	0,469	3,947	0,570	3,766	0,597
10	4,231	0,529	3,856	0,584	3,567	0,626
11	3,087	0,696	3,599	0,621	2,298	0,811
12	1,000	1,000	2,960	0,714	2,913	0,721
13	1,000	1,000	1,465	0,932	2,377	0,799
14	1,000	1,000	1,000	1,000	1,469	0,932
15	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000

TABELA 3.1: Massa específica média (**M_m**) na direção radial medida para diversos pontos na altura do leito formado por água e 20 Kg de esferas de aço.

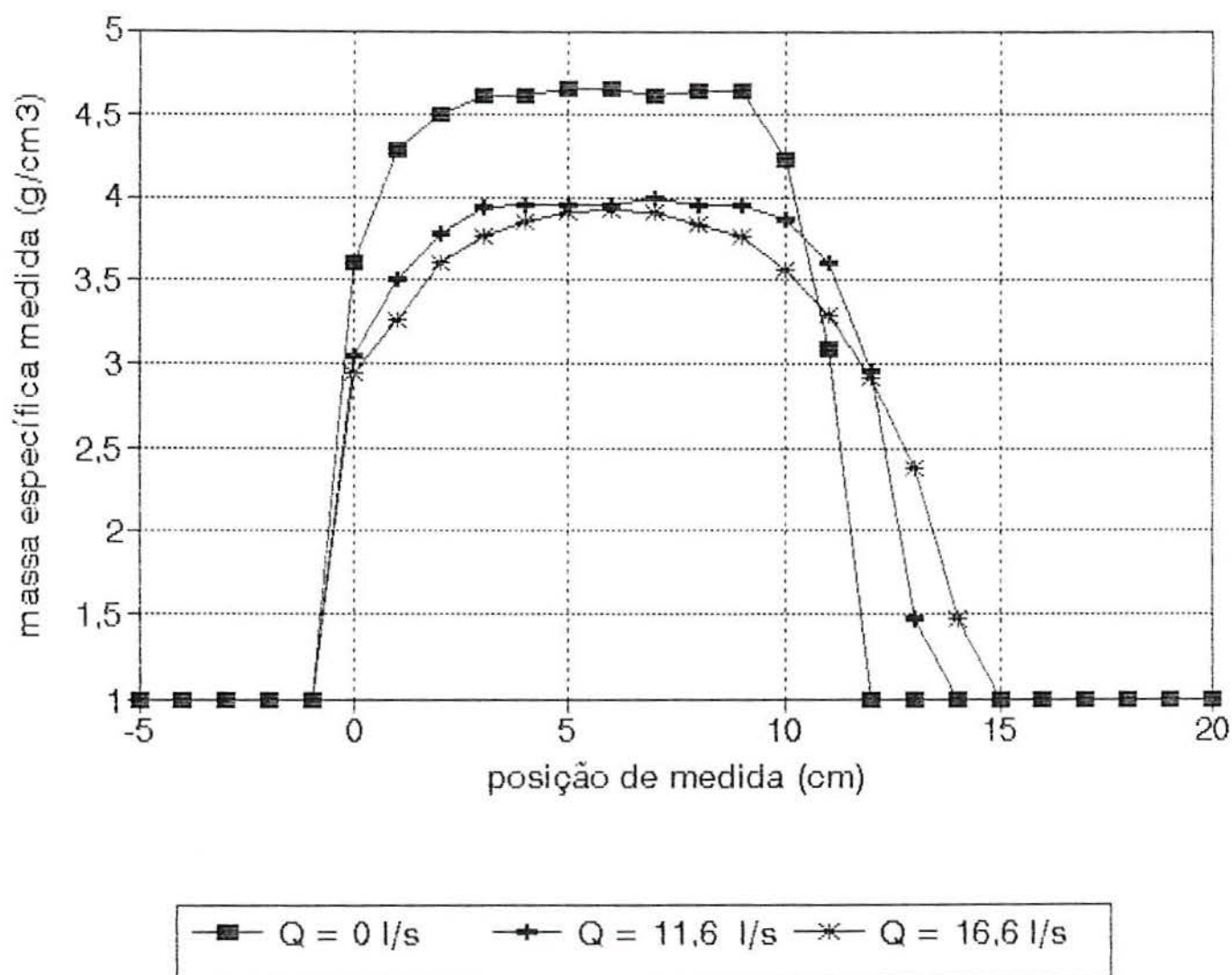


Figura 3.1 – Desenho das curvas de massa específica média em função da posição onde são realizadas as medidas. Curvas para 20 kg de esferas.

Q [l/s]	0		6,9		14,3	
Z	M _m	P	M _m	P	M _m	P
0	2,78	0,740	1,70	0,898	1,67	0,902
1	3,98	0,565	2,80	0,738	2,59	0,768
2	4,37	0,509	3,19	0,681	2,96	0,714
3	4,55	0,482	3,28	0,668	3,08	0,698
4	4,55	0,482	3,32	0,662	3,14	0,688
5	4,63	0,471	3,33	0,660	3,18	0,682
6	4,63	0,471	3,35	0,657	3,21	0,678
7	4,54	0,484	3,33	0,660	3,26	0,671
8	4,70	0,461	3,33	0,660	3,26	0,671
9	4,76	0,452	3,33	0,660	3,26	0,671
10	4,49	0,491	3,33	0,660	3,27	0,669
11	4,67	0,465	3,31	0,663	3,34	0,659
12	4,55	0,483	3,29	0,666	3,40	0,650
13	3,87	0,582	3,26	0,671	3,44	0,644
14	1,87	0,873	3,24	0,773	3,44	0,644
15	1,00	1,000	3,21	0,678	3,41	0,649
16	1,00	1,000	3,17	0,684	3,35	0,657
17	1,00	1,000	3,14	0,688	3,30	0,665
18	1,00	1,000	3,03	0,704	3,16	0,685
19	1,00	1,000	2,96	0,714	2,95	0,716
20	1,00	1,000	2,82	0,735	2,60	0,767
21	1,00	1,000	2,46	0,787	2,06	0,845
22	1,00	1,000	1,63	0,908	1,87	0,873
23	1,00	1,000	1,00	1,000	1,28	0,959
24	1,00	1,000	1,00	1,000	1,25	0,964
25	1,00	1,000	1,00	1,000	1,24	0,965
26	1,00	1,000	1,00	1,000	1,00	1,000

TABELA 3.2: Massa específica média (M_m) na direção radial medida para diversos pontos na altura do leito formado por água e 30 kg de esferas de aço.

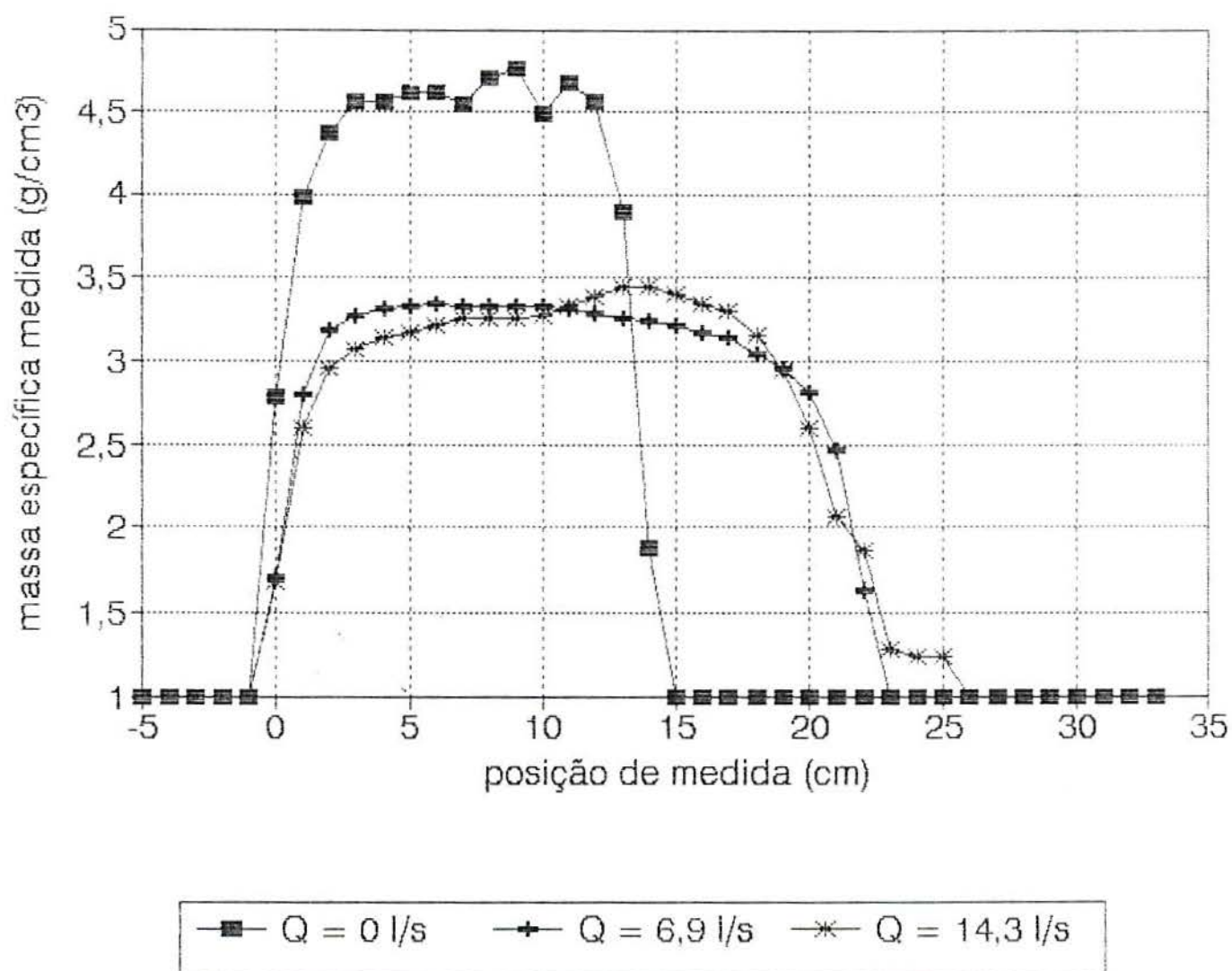


Figura 3.2 – Desenho das curvas de massa específica média em função da posição onde são realizadas as medidas. Curvas para 30 kg de esferas.

Q [l/s]	0		11,7		14,0		16,7		21,1	
Z	M _m	P	M _m	P	M _m	P	M _m	P	M _m	P
0	2,81	0,736	2,29	0,812	2,27	0,815	2,12	0,837	2,10	0,840
1	4,15	0,541	3,76	0,598	3,50	0,636	3,29	0,666	3,57	0,625
2	4,41	0,503	4,53	0,485	4,34	0,513	4,09	0,550	3,89	0,579
3	4,41	0,503	4,40	0,504	4,17	0,538	4,17	0,538	3,80	0,592
4	4,60	0,475	4,45	0,497	4,26	0,525	4,30	0,519	4,75	0,453
5	4,68	0,464	4,43	0,500	4,31	0,517	4,38	0,507	4,77	0,450
6	4,68	0,464	4,50	0,490	4,35	0,512	4,41	0,503	4,80	0,446
7	4,59	0,477	4,48	0,493	4,41	0,503	4,50	0,490	4,83	0,442
8	4,75	0,453	4,48	0,493	4,41	0,503	4,51	0,488	4,98	0,420
9	4,81	0,445	4,48	0,493	4,41	0,503	4,52	0,487	4,81	0,445
10	4,54	0,484	4,47	0,494	4,43	0,500	4,58	0,478	4,82	0,443
11	4,72	0,458	4,45	0,497	4,52	0,487	4,61	0,474	4,36	0,510
12	4,60	0,475	4,42	0,501	4,60	0,475	4,58	0,478	3,89	0,579
13	4,72	0,458	4,39	0,506	4,66	0,466	4,47	0,494	3,35	0,657
14	4,82	0,443	4,36	0,510	4,66	0,466	4,25	0,526	2,79	0,739
15	4,82	0,443	4,32	0,516	4,62	0,472	3,91	0,576	2,58	0,770
16	4,84	0,440	4,27	0,523	4,54	0,484	3,66	0,612	2,04	0,848
17	4,85	0,439	4,22	0,530	4,48	0,493	2,97	0,713	1,88	0,872
18	4,67	0,465	4,08	0,551	4,28	0,522	2,87	0,727	1,96	0,860
19	3,92	0,574	3,98	0,566	3,99	0,564	2,43	0,792	1,84	0,878
20	1,89	0,870	3,78	0,596	3,52	0,633	2,27	0,815	1,82	0,880
21	1,00	1,000	3,31	0,663	2,80	0,738	2,27	0,815	1,92	0,866
22	1,00	1,000	3,18	0,62	2,53	0,777	2,44	0,790	1,86	0,875
23	1,00	1,000	1,00	1,000	1,73	0,894	3,16	0,685	2,14	0,834
24	1,00	1,000	1,00	1,000	1,69	0,899	2,97	0,713	2,20	0,825
25	1,00	1,000	1,00	1,000	1,68	0,901	2,78	0,741	2,26	0,816
26	1,00	1,000	1,00	1,000	1,00	1,000	2,40	0,796	2,47	0,786
27	1,00	1,000	1,00	1,000	1,00	1,000	1,79	0,885	2,67	0,757
28	1,00	1,000	1,00	1,000	1,00	1,000	1,00	1,000	2,76	0,743
29	1,00	1,000	1,00	1,000	1,00	1,000	1,00	1,000	2,950	0,716
30	1,00	1,000	1,00	1,000	1,00	1,000	1,00	1,000	2,88	0,726
31	1,00	1,000	1,00	1,000	1,00	1,000	1,00	1,000	2,63	0,762
32	1,00	1,000	1,00	1,000	1,00	1,000	1,00	1,000	2,37	0,800
33	1,00	1,000	1,00	1,000	1,00	1,000	1,00	1,000	1,00	1,000

TABELA 3.3: Massa específica média (M_m) na direção radial medida para diversos pontos na altura do leito formado por água e 40 Kg de esferas de aço.

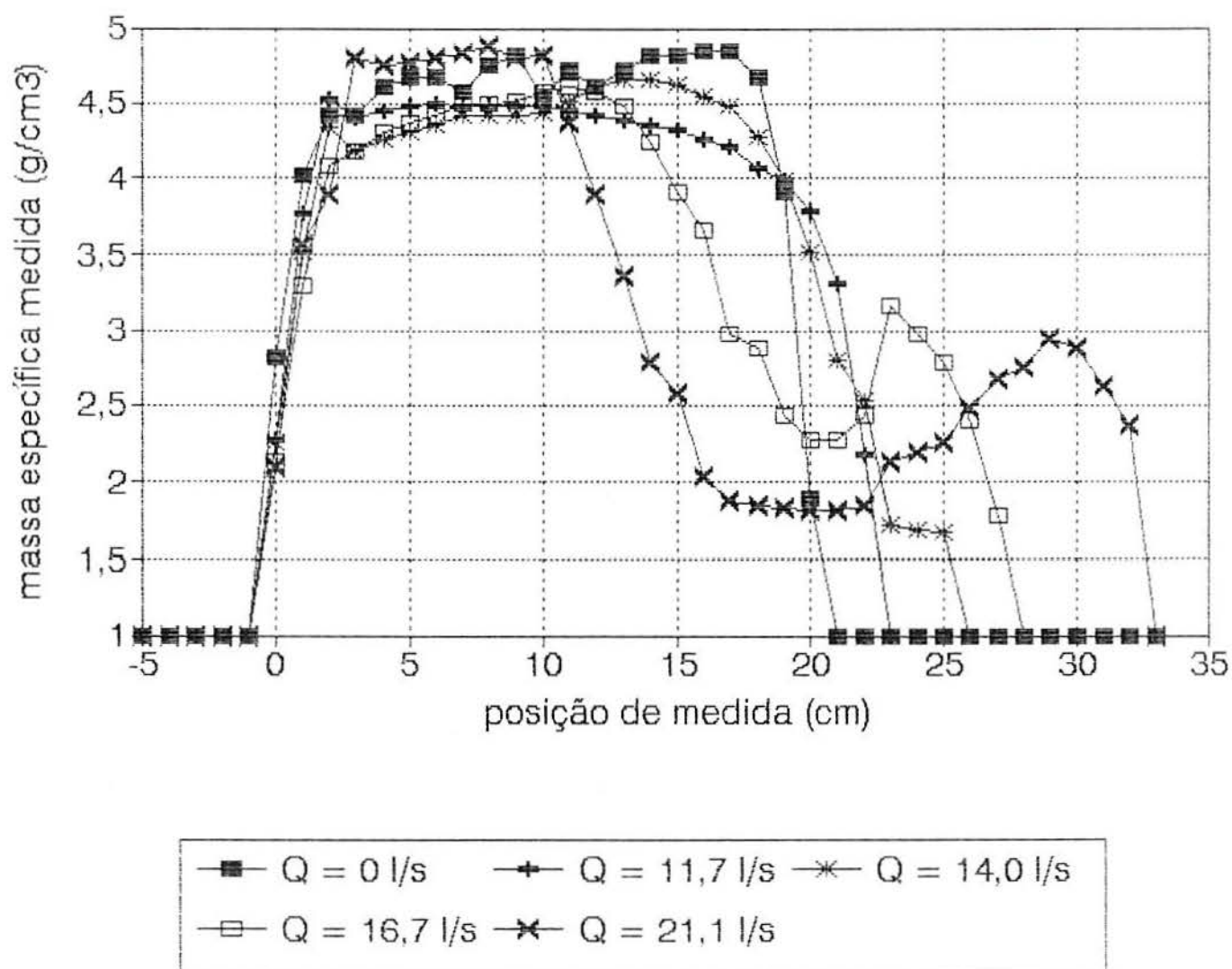


Figura 3.3 – Desenho das curvas de massa específica média em função da posição onde são realizadas as medidas. Curvas para 40 kg de esferas.

4. ANÁLISE E RESULTADOS

A medida da massa específica por meio convencional indicou uma porosidade de 0,459. Em Knol, 1979, vemos que a porosidade para uma distribuição espacial cúbica das esferas é de 0,476. Para uma distribuição espacial ortorrômbica, a porosidade é de 0,395. A figura 4.1 mostra as duas distribuições espaciais citadas.

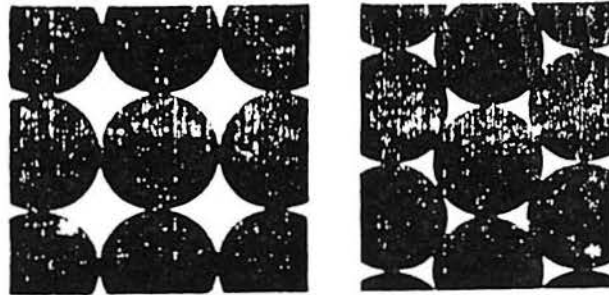


FIG. 4-5

Variação da porosidade segundo a disposição espacial dos componentes esféricos. À esquerda, disposição cúbica, tendo a porosidade o valor máximo de 47,6%. À direita a disposição é ortorrômbica, tendo a porosidade o valor mínimo de 39,5% (Seg. Gratton e Fraser).

Figura 4.1 – Desenho dos tipos de distribuição espacial de esferas

O valor medido encontra-se entre estes 2 valores, o que era de se esperar em virtude da distribuição aleatória das esferas dentro do leito. Há de se considerar também o efeito das paredes laterais, fundo e superfície livre que alteram a homogeneidade da distribuição espacial das esferas.

As medidas efetuadas por meio de atenuação gama para o leito compactado são comparáveis ao valor medido convencionalmente.

Desprezando-se as medidas efetuadas a 2 cm da base e do topo do leito por serem não confiáveis devido às alterações na homogeneidade de distribuição espacial das esferas e da não homogeneidade do feixe de fótons, podemos determinar os valores médios da massa específica média do leito. A tabela 4.1 nos dá estes valores

Massa de esferas	Cotas consideradas	Média (M_m)	Desvio Padrão (σ)
kg	cm	g/cm ³	g/cm ³
20	de 3 a 9	4,63	0,02
30	de 3 a 12	4,61	0,08
40	de 3 a 18	4,69	0,12

TABELA 4.1: Massa específica média (M_m) e Desvio Padrão (σ) do leito colapsado para diversas quantidades de esferas e faixa considerada para a medida.

De posse destes dados podemos determinar a precisão das medidas e o erro sistemático percentual relativo à medida pelo método convencional:

$$\text{Precisão} = (\sigma / M_m) 100 \% \quad 4.1$$

$$\text{Erro sistemático relativo} = [(4,71 - M_m) / 4,71] 100 \% \quad 4.2$$

A tabela 4.2 fornece os valores da precisão e o erro percentual relativo à medida pelo método convencional.

massa de esferas (kg)	precisão %	erro sistemático relativo %
20	0,4	1,7
30	1,7	2,1
40	2,5	0,4

TABELA 4.2: Precisão e erro sistemático percentual relativo à massa específica média medida pelo método convencional em função da quantidade de esferas.

Para determinar-mos a altura do leito colapsado em função da massa de esferas colocadas no leito, consideraremos inicialmente a composição em 1 cm³ de leito, supondo a mistura homogênea. Temos que:

$$v_e + v_a = 1 \quad 4.3$$

$$d_e \cdot v_e + d_a \cdot v_a = M_m \quad 4.4$$

Considerando-se que $d_e = 7,86 \text{ g/cm}^3$, $d_a = 1,00 \text{ g/cm}^3$ e que $M_m = 4,71 \text{ g/cm}^3$ temos, resolvendo este sistema de 2 equações e 2 incógnitas, que:

$$v_e = 0,5408 \text{ e } v_a = 0,4592 \quad 4.5$$

Estas são as frações volumétricas de cada componente no leito colapsado.

Temos que 1 cm^3 de leito colapsado conterá:

$$0,5408 \text{ cm}^3 \cdot 7,86 \text{ g/cm}^3 = 4,25 \text{ g de ferro} \quad 4.6$$

Considerando que a área transversal do tubo de fluidização era de $505,11 \text{ cm}^2$, conforme determinado no item 3.2, podemos determinar a altura para o leito colapsado em função da massa de esferas colocadas:

$$H_0 = M_{fe} / 2146,7 \text{ cm} \quad 4.7$$

Aqui M_{fe} representa a massa total de esferas colocadas no leito e H_0 a altura do leito colapsado para esta quantidade de esferas.

A tabela 4.3 nos fornece os valores da altura teórica do leito colapsado H_0 , a altura do leito colapsado medido H_{med} , a altura máxima do leito obtida sem haver formação de leito agregativo (heterogêneo) H_{max} e a máxima expansão do leito particulado que é dada pela relação:

$$\text{expansão} = [(H_{max} - H_{med}) / H_{med}] \cdot 100\% \quad 4.8$$

A tabela 4.3 ainda nos fornece o valor da Q_{max} .

M_{fe}	H_0	$H_0/25,36$	H_{med}	H_{max}	expansão	Q_{max}
g	cm		cm	cm	%	l/s
20	9,32	0,36	10,4	12,0	15,4	16,6
30	13,97	0,55	14,3	21,0	47,0	14,3
40	18,63	0,73	20,0	22,5	12,5	16,7

TABELA 4.3: parâmetros geométricos e vazão máxima em função da quantidade total de esferas

M_{fe} representa a quantidade total de esferas de aço colocadas no leito, H_0 a altura teórica do leito compactado, $H_0/25,36$ relação entre a altura teórica do leito compactado e o diâmetro de tubo de fluidização, H_{med} a altura do leito compactado medido, H_{max} a altura máxima de fluidização sem formar leito agregativo, **expansão** a máxima expansão sem formar leito agregativo e Q_{max} a vazão máxima sem formar leito agregativo.

Observando-se esta tabela vemos que a maior expansão, sem haver formação de leito agregativo, foi de 47 % quando a relação entre altura de leito compactado para diâmetro do tubo de fluidização era de 0,55. A vazão máxima, sem formar leito agregativo, praticamente não se alterou em função da massa total de esferas colocadas no leito, permanecendo em torno de 16 l/s.

A análise dos gráficos correlacionando a massa específica média do leito em função da altura considerada, nos permite afirmar que o leito estando em estado de fluidização particulado a porosidade não é constante em todo o leito e sim apresenta um mínimo no centro do leito aumentando tanto para cima como para baixo.

5. CONCLUSÕES

O estudo do comportamento do leito pretensamente fluidizado aliado aos dados obtidos com as medidas efetuadas nos permite concluir, nas condições do presente trabalho, que:

A tela limitadora da altura do leito provoca a bipartição do leito formando um leito compactado invertido na sua parte inferior. Deve ser previsto outro tipo de limitador de altura do leito.

O anel de controle não pode ser colocado dentro do tubo de fluidização pois provoca o transporte das esferas para a parte superior do mesmo. Deverá ser estudada outra maneira de colocação ou forma de controle.

A comparação entre a medida convencional da massa específica do leito colapsado com a realizada por meio de atenuação gama permite afirmar que a técnica de absorção gama é uma ferramenta útil para medidas de uniformidade do leito, pois permite obter informações relativas ao interior do leito sem interferir no movimento do fluido e das esferas.

O intervalo de vazões que o leito deixa de ser particulado até formar jato aumenta com o aumento da relação altura do leito colapsado e diâmetro do tubo de fluidização, isto é, para 20 kg de esferas praticamente passamos de particulado para jato em torno da vazão de 16 l/s, ao passo que para 40 kg a vazão variou de aproximadamente 14 l/s até aproximadamente 21 l/s.

A maior expansão do leito fluidizado ocorreu para valores intermediários da relação altura do leito calaceado e diâmetro do tubo de fluidização. No nosso experimento o valor máximo foi de 47 % para a relação de 0,55 . A expansão diminuiu rapidamente para valores maiores e menores do que este.

Na fase de leito particulado, a porosidade não é constante no interior do leito. Apresenta um valor mínimo próximo à parte central e aumenta quando nos dirigimos para os extremos.

Com o aumento da vazão aumenta a variação da porosidade no interior do leito.

Este trabalho demonstrou que a parte hidráulica do modelo proposto por Sefidvash, 1985, apresenta diversos problemas de funcionamento devido ao modo como foi concebido. As esferas, quando compactadas dentro do tubo de 100 mm, formam um meio poroso que torna difícil a movimentação das mesmas para o tubo de maior calibre. Num reator real haveria sérios problemas de retirada de calor quando o reator fosse desligado. Existiria, portanto, a necessidade da existência de uma bomba de altíssima pressão tanto para dar início ao processo de fluidização como para manter a refrigeração das esferas. O distribuidor apresentado não é próprio para o tipo de fluidização pretendida. É mais indicado para aplicações onde se requer a formação de jato. A tela limitadora de nível divide o leito em duas partes formando dois leitos compactados um junto à tela e outro na parte inferior. O anel de controle retira as esferas da parte inferior e as leva para a parte acima do mesmo. A fluidização não forma porosidade igual em todo o volume do leito conforme é considerada nos trabalhos teóricos. É menor próxima à metade da altura e aumenta para cima e para baixo. Independentemente da quantidade de esferas colocadas para fluidização, a vazão máxima sem formar leito agregativo é sempre a mesma. Neste modelo obtemos valores em torno de 16 l/s. Num reator real isto limitaria a quantidade de calor a ser extraída do núcleo por unidade de tempo, isto é, seria um dos fatores determinantes da potência máxima do mesmo. A expansão máxima do leito com a vazão é função da quantidade de esferas a serem fluidizadas que, no nosso experimento, apresentou um máximo para 30 kg de esferas. Este é outro fator limitante da potência para um reator real: a quantidade de combustível possível de ser utilizada no reator.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Vimos no capítulo anterior dois fatores limitantes da potência de um reator construído com base neste modelo: a vazão máxima sem formar leito agregativo e a quantidade total de esferas.

Com esferas de aço de 8 mm encontramos, para melhor fluidização, a relação entre altura do leito compactado e o diâmetro do tubo de fluidização de 0,55 enquanto Kelly, 1961, para esferas de aço com $\frac{3}{4}$ de polegada encontrou 1.

Face às diferenças de massas específicas entre as esferas de aço utilizados neste experimento e as preconizadas no conceito de Sefidvash, 1985, sugerimos a confecção de esferas exatamente como a proposta no referido conceito mas utilizando-se o urânio natural. Com estas esferas determinar os parâmetros citados acima e estudar as condições para movimentação das esferas da câmara de combustível para o tubo de fluidização. De posse destes dados determinar o volume do gerador de vapor e os parâmetros da bomba do circuito primário (pressão e vazão).

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Borges, V. , 1994, **“Estudo do conceito de um reator nuclear a leito fluidizado”**, Tese de Doutorado, Porto Alegre, UFRGS-PROMEC.

Borges, V et Vilhena, M. T., 1995, **“Dynamic stability of a fluidized-bed nuclear reactor”**, Nuclear Technology, Vol 111, pp 251-259.

Daugherty, R. L. et al, **“Mecanica de los fluidos”**, Editorial Hispano Americana S.A. , Buenos Aires.

ISO /WD 5168.2 , **“Guide to the expression of uncertainty in measurement”**, International Organization of Standardization, 1995.

Kelly, V. P. , 1961, **“Hidraulic studies for the fluid-bed reactor”**, Nuclear Science Engineering, v.10, p. 40-44.

Knol, G. F. , 1979, **“Radiation Detection and Measurement”**, John Wiley & Sons, New York.

Kohl, J. et al., **“Radioisotope applications engineering”**, D. Van Nostrand Company, Inc. , Princeton.

Lamarsh, J. R., 1975, **“Introduction to nuclear engineering”**, Addison-Wesley Publishing Company, Massachusetts.

Lepecki, W. P. S. et al., 1968, **“Introdução à geração núcleo-elétrica”**, Instituto de Pesquisas Radioativas, Belo Horizonte.

Mattos, J. R. L., 1988, **“Cálculos neutrônicos aplicados ao reator a leito fluidizado”**, Dissertação de mestrado, Porto Alegre, UFRGS-PROMEC.

Mizuno, T et al., 1990, **"The inherently-safe fluidized-bed boiling water reactor concept"**, Techn. Nucl. Energy, Vol 17, No 9, pp 487-492.

Morris J. B. et. al., 1956, **"The application of fluidization techniques to nuclear reactors"**, Trans. Inst. Chem. Eng., v.34, p. 168-194.

Rammsy, J. E. M., 1995, **"Estudo da reatividade do reator nuclear a leito fluidizado"**, Dissertação de mestrado, Porto Alegre, UFRGS-PPGEM.

Sefidvash, F., 1985, **"A fluidized bed nuclear reactor concept"**. Nuclear Technology, v.71, p. 527-534.

Streck, E. E., 1988, **"Estudo do transiente de um reator nuclear a leito fluidizado"**, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, UFRGS.

Vilhena, M. T., 1988, **"Estudo de difusão de neutrons e calor dependente do tempo num reator nuclear a leito fluidizado"**. Tese de Doutorado, Porto Alegre, UFRGS-PROMEC.